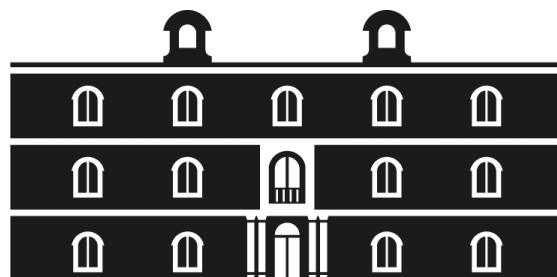




Universidad
Politécnica
de Cartagena



industriales
etsii UPCT

***Modelización del sistema de
tracción eléctrica y de
alimentación de un vehículo solar
de fines experimentales.***

Titulación: Ingeniería Industrial
Alumno/a: Inmaculada Martínez Vidal
Director/a/s: Francisco de Asís Ruz Vila

Cartagena, 3 de julio de 2012

ÍNDICE.

1. INTRODUCCIÓN.....	1- 6
1.1 Objeto del proyecto.....	2
1.2 Alcance del proyecto.....	2 – 3
1.3 Estructura del proyecto.....	3 – 6
1.3.1 Capítulo 2: Estado del arte.....	4
1.3.2 Capítulo 3: Caso de estudio.....	4
1.3.3 Capítulo 4: Descripción del simulador.....	5
1.3.4 Capítulo 5: Adaptación de los modelos y simulaciones.....	5 – 6
1.3.5 Capítulo 6: Conclusiones.....	6
<hr/>	
2. ESTADO DEL ARTE.....	7- 22
2.1 Bibliografía de referencia.....	8
2.2 Caso propuesto por los artículos tomados como referencia en este proyecto.....	9 - 12
2.3 Modelos propuestos en el artículo donde se realizan una serie de simulaciones con el bloque motor alimentado por una fuente de tensión constante.....	12 - 16
2.4 Modelos de panel fotovoltaico propuestos en la bibliografía consultada.....	16 – 22

2.4.1	Primer modelo para el panel fotovoltaico.....	17 - 20
2.4.2	Segundo modelo para el panel fotovoltaico.....	20 – 22

3 DEFINICIÓN DEL CASO DE ESTUDIO.....23 - 43

3.1	Introducción al caso de estudio.....	23 - 26
3.2	Bloque motor.....	26 - 43
3.2.1	introducción al motor para el vehículo eléctrico.....	26 - 28
3.2.2	Máquina de corriente continua.....	28 - 43
3.2.2.1	Elementos que constituyen las máquinas de corriente continua.....	29 - 32
3.2.2.2	Clasificación de las máquinas de corriente continua.....	32 - 43
3.2.2.2.1	Máquina DC de excitación en derivación.....	33 - 34
3.2.2.2.2	Máquina DC de excitación separada.....	35
3.2.2.2.3	Máquina DC de excitación en serie.....	35 - 37
3.2.2.2.4	Máquina DC de excitación compuesta.....	37 - 38
3.2.2.2.5	Máquina DC de imanes permanentes.....	39 - 43
3.2.3	Ecuaciones que definen el comportamiento del sistema.....	43 - 44
3.2.4	Definición de las curvas de velocidad angular, intensidad de la armadura y par en función del tiempo para el caso de estudio.....	44 - 46
3.3	Panel fotovoltaico.....	47 - 58
3.3.1	Introducción al panel fotovoltaico.....	47 - 49
3.3.2	Curva de máxima potencia (MPP) y factor de relleno (FF).....	49 - 51
3.3.3	Rendimiento de la célula fotovoltaica.....	51 - 52
3.3.4	Primer modelo de la célula fotovoltaica desarrollado en este proyecto.....	53 – 55

3.3.5 Segundo modelo de la célula fotovoltaica desarrollado en este proyecto.....	55 – 57
---	---------

4 DESCRIPCIÓN DEL SIMULADOR.....58 – 86

4.1 Bloque motor de Matlab-Simulink.....	59
4.1.1 Programación del bloque ‘DC Machine’ en Matlab-Simulink.....	59 - 62
4.1.2 Esquema de partida del bloque PMDC motor en Matlab simulink.....	62 - 65
4.2 Bloque de control de Matlab-Simulink aplicado al motor.....	65 - 77
4.2.1 Saturation (limitador).....	69 - 70
4.2.2 Relay.....	70 - 71
4.2.3 IGBT (Transistor de compuerta aislada).....	72 - 74
4.2.3.1 Transistor IGBT en saturación.....	73
4.2.3.2 Transistor IGBT en corte.....	73 - 74
4.2.4 Diode (diodo).....	75 - 77
4.2.4.1 Bloque ‘Diode’ de Matlab-Simulink.....	76 - 77
4.3 Primer modelo de panel fotovoltaico desarrollado en Matlab-Simulink.....	77 - 83
4.3.1 Bloque final en Matlab-Simulink del primer modelo de panel fotovoltaico.....	78 - 79
4.3.2 Subsistemas que constituyen el bloque final del panel fotovoltaico.....	80 - 83
4.4 Segundo modelo de panel fotovoltaico desarrollado en Matlab-Simulink.....	83 - 86

5. ADAPTACIÓN DE LOS MODELOS Y SIMULACIONES...87 - 139

5.1	Primera simulación.....	88 - 91
5.2	Segunda simulación.....	91 - 94
5.3	Tercera simulación.....	94 - 100
5.3.1	Simulación de sistemas eléctricos discretos.....	95 - 97
5.3.2	Generador de pulsos en Matlab-simulink.....	97 - 98
5.3.3	Funcionamiento del esquema y resultados de la tercera simulación.....	98 - 100
5.4	Cuarta simulación.....	101 - 103
5.5	Quinta simulación.....	103 - 107
5.5.1	Primer caso ($G = 2$ y $J = 0,05$).....	103 - 106
5.5.2	Segundo caso ($G = 10$ y $J = 0,005$).....	106 - 107
5.6	Sexta simulación.....	108 - 112
5.6.1	Primer caso ($G = 2$ y $J = 0,05$).....	108 - 110
5.6.2	Segundo caso ($G = 10$ y $J = 0,005$).....	111 - 112
5.7	Séptima simulación.....	112 - 120
5.7.1	Primer caso ($J = 0,05, Gp = 50, Gi = 4, Gd = 0,6$).....	113 - 115
5.7.2	Segundo caso ($J = 0,005, Gp = 50, Gi = 4, Gd = 0,6$).....	115 - 117
5.7.3	Tercer caso ($J = 0,05, Gp = 50, Gi = 0, Gd = 0$).....	117 - 118
5.7.4	Cuarto caso ($J = 0,005, Gp = 50, Gi = 0, Gd = 0$).....	119-120

5.8 Octava simulación.....	121 - 123
5.9 Novena simulación.....	123 - 127
5.9.1 Señales error obtenidas de la simulación.....	124 - 126
5.9.2 Señales de salida velocidad, intensidad de la armadura y par obtenidas de la simulación.....	126 - 127
5.10 Décima simulación.....	128 - 132
5.10.1 Señales error obtenidas de la simulación.....	129 - 131
5.10.2 Señales de salida velocidad, intensidad de la armadura y par obtenidas de la simulación.....	131 - 132
5.11 Undécima simulación.....	133 - 138
5.11.1 Señales error obtenidas de la simulación.....	134 - 136
5.11.2 Señales de salida velocidad, intensidad de la armadura y par obtenidas de la simulación.....	137 - 138
5.12 Duodécima simulación.....	139 - 140

6. ANÁLISIS Y CONCLUSIONES DE LAS SIMULACIONES.....141 - 168

6.1 Influencia de los elementos de potencia en las simulaciones.....142 - 143

6.1.1 Tercera simulación y cuarta simulación.....142 - 143

6.2 Bloques de control incluidos en las simulaciones.....143 – 161

6.2.1 Resumen del control proporcional, integral y derivativo.....143 - 145

6.2.2 Quinta simulación.....145 - 147

6.2.3 Sexta simulación.....147 - 149

6.2.4 Séptima simulación.....149 - 152

6.2.5 Octava simulación.....152 - 155

6.2.6 Novena y décima simulación.....156 - 161

6.3 Análisis del modelo final de motor de continua de imanes permanentes alimentado por un panel fotovoltaico.....161 - 168

6.4 Características I-V y P-V de un panel fotovoltaico e influencia con el nivel de irradiación solar.....168

-
- **BIBLIOGRAFÍA.**
 - **ANEXO I.**

CAPÍTULO 1.

INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Objeto del proyecto

En este proyecto se pretende modelizar con el programa 'Matlab-Simulink', el sistema de tracción eléctrica y de alimentación de un vehículo solar de fines experimentales, en concreto un motor de corriente continua de imanes permanentes de características similares a las que presenta el prototipo del vehículo Aníbal, desarrollado por el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica de Cartagena, y con el objetivo de poder conocer cómo se comporta dicho motor a lo largo del tiempo y en función de los distintos parámetros que influyen en su funcionamiento.

De este modo, el objetivo principal será obtener una serie de simulaciones con Matlab-Simulink para cada uno de los modelos de motor presentados hasta llegar a la implementación del modelo final del motor que es objeto de estudio, donde se pueda estudiar el comportamiento a lo largo del tiempo de algunos parámetros del motor tales como la velocidad angular, intensidad de la armadura y par electromagnético para un tiempo de simulación fijado.

1.2 Alcance del proyecto

El presente proyecto aborda la simulación con Matlab-Simulink del comportamiento del motor de corriente continua de imanes permanentes que es objeto de estudio, elaborando un modelo final del mismo, para el cual es necesario estructurar el trabajo en tres pasos fundamentalmente.

Los pasos previos a la obtención del modelo final se citan a continuación:

- Realizar una serie de simulaciones con Matlab-Simulink con el bloque motor para los diversos modelos propuestos de menor a mayor complejidad, empleando como alimentación una fuente de tensión constante de 36 voltios.
- Aplicar el control de la velocidad, intensidad y potencia del motor mediante tres bloques de cálculo de los errores de velocidad, intensidad y potencia, aplicando el error total a un controlador PID.

- Finalmente, una vez aplicado el control al motor, se sustituye la fuente de tensión constante que alimentaba al motor en simulaciones anteriores, por el panel fotovoltaico, elaborando un modelo de funcionamiento del mismo con Matlab-Simulink y llevando a cabo la simulación final del motor que defina su comportamiento a lo largo del tiempo.

Para la elaboración del modelo del motor, se ha consultado, principalmente, la siguiente bibliografía: *'An Efficient Tri-Loop Controller for Photovoltaic Powered Four-Wheel Electric Vehicle'* y *'A Hybrid Photovoltaic PV Array-Battery Powered EV-PMDC Drive Scheme'*, ambos publicados por *'Institute of Electrical and Electronics Engineers'*.

Los artículos anteriormente citados, se han tomado como referencia dada la proximidad que guardan con el caso de estudio. Así, mientras que el motor de imanes permanentes se alimenta por 36 V en el caso presentado en la bibliografía, el motor del coche Aníbal es alimentado por 32 V. En consecuencia, se han tomado los datos presentados en dichos documentos para la recreación del modelo, pues tratan un motor con condiciones muy próximas a las del vehículo 'Aníbal'.

1.3 Estructura del proyecto

El presente proyecto se estructura de la forma siguiente:

- Análisis de los casos planteados en la bibliografía consultada.
- Planteamiento del caso de estudio y descripción del mismo.
- Desarrollo del esquema del motor en Matlab-Simulink, junto al esquema de control y modelos que definen el panel fotovoltaico.
- Estudio de los casos planteados en Matlab-Simulink, y presentación de los resultados obtenidos de las simulaciones.
- Obtención de las conclusiones finales.

A continuación vamos a definir los diversos capítulos que constituyen este proyecto, y el objetivo de cada uno de ellos.

1.3.1 Capítulo 2: Estado del arte.

En el capítulo 2 se analiza la principal bibliografía consultada para llevar a cabo el presente proyecto. Los artículos tomados como referencia, estudian un caso de motor de continua de imanes permanentes similar al que es objeto de estudio en este proyecto. También, se sigue un artículo donde se realizan una serie de simulaciones con diversas variantes del esquema del motor en Matlab-Simulink (*‘Workshop: Matlab/Simulink in Drives and Power electronics, DC Motor Chopper Control’*). En cuanto al modelo de panel fotovoltaico, se estudian dos artículos (*‘A Photovoltaic Array Simulation Model for Matlab-Simulink GUI Environment’* y *‘PV Module Simulink models’*) donde se presentan dos modelos diferentes para el panel fotovoltaico, el primero basado en la ecuación que define la tensión de la célula fotovoltaica, y el segundo basado en la ecuación que define la corriente generada por la célula. Ambos modelos son llevados a Matlab- Simulink, pero sólo el primero se incluye en el esquema final del motor, por analogía al caso de motor presentado en la bibliografía base consultada.

El segundo modelo de panel, es utilizado con el fin de obtener las curvas características que definen todo panel fotovoltaico ($V - I$ y $V - P$) para diferentes niveles de radiación, con el objetivo de presentar un modelo que defina cualquier panel fotovoltaico dadas las especificaciones del fabricante.

1.3.2 Capítulo 3: Caso de estudio.

En primer lugar, en este capítulo se plantea el caso de estudio junto con la descripción de las máquinas de corriente continua y su clasificación. Luego se define de forma más detallada el motor que es objeto de estudio, el funcionamiento del mismo junto con las ecuaciones que definen su comportamiento.

Luego se realiza una introducción al panel fotovoltaico, tratando aspectos tales como *‘la característica Tensión-Intensidad ($V-I$)’*, *‘punto de máxima potencia (MPP)’* y *‘rendimiento de la célula’*, junto con los dos modelos desarrollados en Matlab-Simulink, describiendo de forma detallada cada una las ecuaciones que comprenden los mismos.

1.3.3 Capítulo 4: Descripción del simulador.

En este capítulo se estudia el esquema básico en Matlab-Simulink del motor de continua de imanes permanentes. Para ello se emplea el bloque 'Dc-machine' junto con otra serie de bloques de Matlab-Simulink.

Como primer paso al estudio temporal de la velocidad angular, par e intensidad, se programa con el editor de Matlab el sistema de ecuaciones diferenciales no lineales de segundo orden que define el comportamiento del motor, y éste se resuelve mediante el método de Runge-Kuta, obteniéndose una serie de gráficos que dan una primera idea del comportamiento de la velocidad, par e intensidad de la armadura a lo largo del tiempo.

Las ecuaciones que constituyen el sistema de ecuaciones diferenciales no lineales de segundo orden son las denominadas por '*ley de Kirchoff de las tensiones*' y '*el sumatorio de los pares del motor igual a cero*'.

Luego se pasa al estudio del esquema del motor, incluyendo el bloque dedicado al control en Matlab-Simulink. El sistema de control empleado, se basa en un controlador PID con tres ciclos. Estos ciclos corresponden a tres bucles de estimación del error total cometido y aplicado al controlador PID. En el primer bucle se calcula el error de la velocidad del motor, en el segundo el error en la potencia del motor y en el tercero el error de la intensidad del motor. Finalmente, la suma de los tres errores multiplicado por una factor de ponderación, constituye el error total aplicado en el controlador.

Al final de este capítulo se describen los esquemas de Matlab-Simulink que comprenden los dos modelos de panel fotovoltaico llevados a cabo en este proyecto.

1.3.4 Capítulo 5: Adaptación de los modelos y simulaciones.

En el capítulo 5 se presentan los esquemas desarrollados con el bloque motor en Matlab-Simulink de menor a mayor complejidad, junto a los resultados obtenidos de las simulaciones.

Las primeras simulaciones llevadas a cabo con el bloque motor, están basadas en los esquemas propuestos por uno de los artículos de la bibliografía consultada (*PV Module Simulink models*), de modo que se define en Matlab-Simulink el esquema propuesto en el mismo, y luego se adapta al caso de estudio. En cada una de las simulaciones realizadas en Matlab-Simulink, el motor se alimenta por una fuente de tensión constante de 36 V, salvo en la última simulación donde se sustituye la fuente de tensión constante por el modelo de panel fotovoltaico desarrollado en este proyecto.

Como resultado de las simulaciones, se obtienen una serie de gráficas de la velocidad angular, intensidad de la armadura y par en función del tiempo de simulación.

También se realizan simulaciones, variando el valor numérico de algunos de los parámetros tales como el momento de inercia, constantes de proporcional, derivativa e integral del controlador PID y ganancias, con el objetivo de estudiar los cambios presentados en las curvas obtenidas en las simulaciones con respecto a la situación inicial.

Como paso previo a sustituir la fuente de tensión constante de 36 V por el primer modelo de panel fotovoltaico, se simula el funcionamiento del panel fotovoltaico presentado en segundo modelo, para las especificaciones del panel BP3150U (Anexo I).

Al final de este capítulo se define el esquema final desarrollado en Matlab-Simulink que comprende el motor de continua de imanes permanentes que es objeto de estudio, junto con el esquema de control y la alimentación del motor mediante el panel fotovoltaico (primer modelo).

1.3.5 Capítulo 6: Conclusiones.

En el último capítulo del proyecto, se establecen una serie de conclusiones finales a partir del análisis realizado de los resultados que se han obtenido en cada una de las simulaciones presentadas en el capítulo 5.

CAPÍTULO 2.

ESTADO DEL ARTE.

2. ESTADO DEL ARTE.

2.1 Bibliografía de referencia.

En este capítulo se va a analizar la principal bibliografía consultada para la elaboración del presente proyecto.

La bibliografía seguida para la elaboración del modelo final del motor en Matlab-Simulink se basa en dos artículos publicados ambos por *'Institute of Electrical and Electronics Engineers'*.

- *'An Efficient Tri-Loop Controller for Photovoltaic Powered Four-Wheel Electric Vehicle'*
- *'A Hybrid Photovoltaic PV Array-Battery Powered EV-PMDC Drive Scheme'*

Como primer paso en el diseño realizado en Matlab-simulink de una serie de modelos con el bloque motor, todos ellos alimentados por una fuente de tensión constante, se ha seguido para estas simulaciones de partida el artículo *'Workshop: Matlab/Simulink in Drives and Power electronics, DC Motor Chopper Control'* publicado por *'Universite Paris-sud 11'*.

Finalmente, para el diseño del modelo del panel fotovoltaico se han seguido dos artículos principalmente, donde se proponen dos modelos completamente diferentes, ambos con el objetivo de simular el funcionamiento de un panel fotovoltaico y de obtener la típica curva $I - V$ que caracteriza a los mismos.

Por este motivo, se han llevado a cabo con Matlab-Simulink dos modelos que simulan el funcionamiento del panel fotovoltaico, el segundo más complejo que el primero.

Para el primer modelo propuesto se ha consultado el artículo: *'A Photovoltaic Array Simulation Model for Matlab-Simulink GUI Environment'* publicado por *'Institute of Electrical and Electronics Engineers'*.

Para el segundo modelo propuesto, se ha consultado el artículo: *'PV Module Simulink models'* publicado por *'University of Colorado'*.

2.2 Caso propuesto por los artículos tomados como referencia en este proyecto.

En este apartado se describe el caso planteado por los artículos tomados como referencia en este proyecto, es decir, *'An Efficient Tri-Loop Controller for Photovoltaic Powered Four-Wheel Electric Vehicle'* y *'A Hybrid Photovoltaic PV Array-Battery Powered EV-PMDC Drive Scheme'*.

El sistema propuesto consta de cuatro partes según se muestra en la Figura 2.1. Hay una tensión continua alimentando a un panel fotovoltaico, un chopper dc-dc, un controlador y cuatro bloques motor PMDC de un vehículo eléctrico.

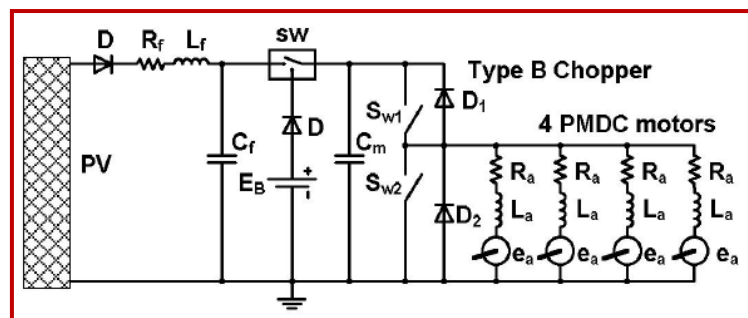


Figura 2.1. Sistema propuesto para el vehículo eléctrico con cuatro bloques motor

El esquema del prototipo del vehículo eléctrico de cuatro bloques motor aparece representado en la Figura 2.2.

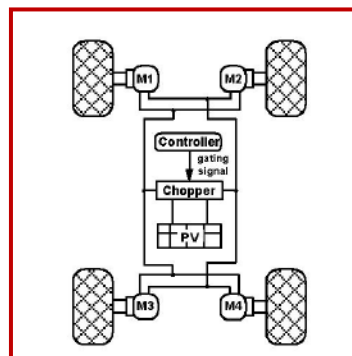


Figura 2.2 Esquema del prototipo de vehículo eléctrico

El tipo de motor empleado en los casos de la bibliografía consultada, se trata precisamente de un motor de continua de imanes permanentes.

Para llevar a cabo la simulación del sistema se ha diseñado un modelo con Matlab-Simulink, donde se recogen cada una de las partes que definen el prototipo del sistema.

Para el control del sistema se ha propuesto un triple bucle donde se calculan los errores de la velocidad, intensidad y potencia del sistema (Figura 2.3).

El error total asignado al controlador PID, se obtiene por la suma de los errores de velocidad, intensidad y potencia multiplicados por los factores $\gamma_w, \gamma_I, \gamma_P$ respectivamente.

$$e_t = e_w \cdot \gamma_w + e_I \cdot \gamma_I + e_P \cdot \gamma_P \quad (2.1)$$

La señal de salida del controlador es limitada por un limitador. Luego la señal de salida del limitador va a un bloque PWM y el bloque genera dos pulsos que alimentan al Chopper dc-dc de dos cuadrantes. La tensión de la armadura del PMDC motor es controlada mediante el ajuste de las funciones conmutación de los interruptores Chopper. El interruptor SW1 para el bucle principal de regulación de la velocidad, mientras que el interruptor SW2 para el opcional bucle de limitación/frenado de la intensidad.

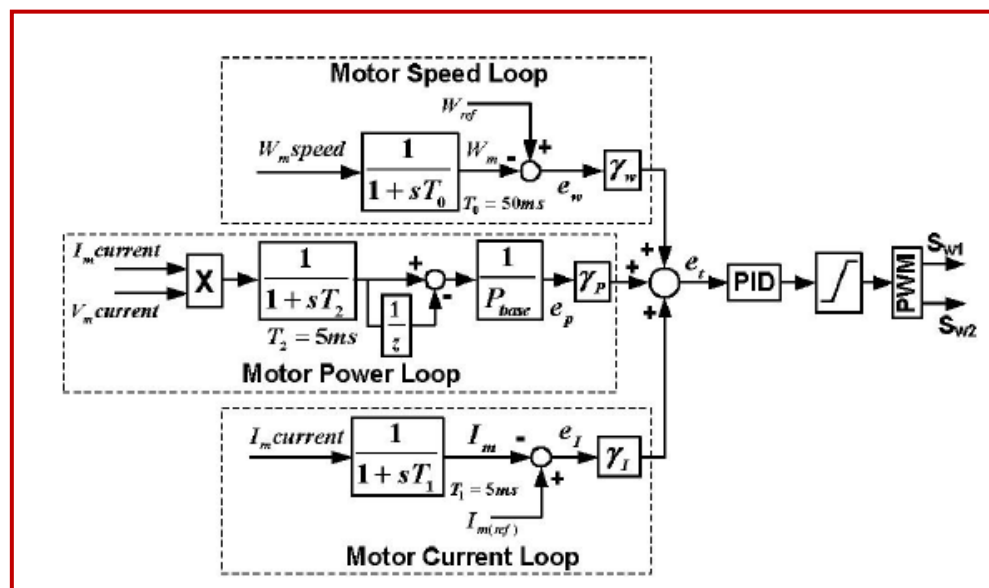


Figura 2.3. Esquema de control propuesto de la velocidad, intensidad y potencia con controlador PID

[illegible]

Otra clara diferencia con el esquema propuesto en los artículos consultados (Figura 1.2), es el número de bloques motor utilizados para la propulsión del vehículo eléctrico, ya que aparecen cuatro bloques motor a diferencia de nuestro caso de estudio, dónde sólo hay un bloque motor.

Pese a las diferencias existentes en relación al caso de estudio presentado en este proyecto, se han tomado los datos presentados en dichos artículos como datos del caso de estudio (Tabla 4.1).

2.3 Modelos propuestos en el artículo donde se realizan una serie de simulaciones con el bloque motor alimentado por una fuente de tensión constante.

En el artículo ‘Workshop: Matlab/Simulink in Drives and Power electronics, DC Motor Chopper Control’, se crean una serie de modelos con el bloque motor para llevar a cabo las simulaciones de la velocidad, intensidad y par en función del tiempo.

El primer modelo que se propone, corresponde a un modelo sencillo de motor de continua de imanes permanentes alimentado por una fuente de tensión constante de 100 V (Figura 2.).

En las simulaciones realizadas en este proyecto se llevaran a cabo las simulaciones que aparecen en este artículo, y luego se adaptaran las mismas al caso de estudio.

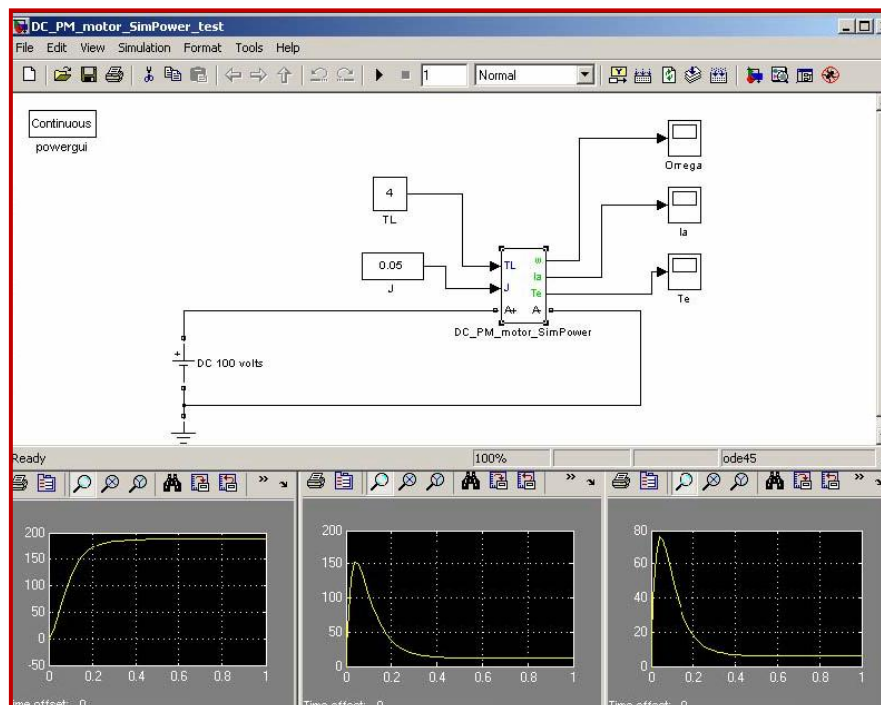


Figura 2.5. Primer modelo propuesto en el artículo de referencia y simulaciones.

Los datos para el bloque motor presentado en este artículo aparecen en la tabla siguiente.

Tensión de fuente	V_m	100 V
Inductancia	L_m	10 mH
Resistencia	R_m	0,5 Ω
Constante de tensión	K_e	0,5 V · s/rad
Par de fricción de Coulomb	T_f	0,1 N · m
Momento de inercia	J	0,05 Kg · m ²
Coefficiente de fricción viscosa	B_m	0,01 N · m · s
Par	T_l	4 N · m

Tabla 2.1. Datos del bloque motor del artículo ‘An Efficient Tri-Loop Controller for Photovoltaic Powered Four-Wheel Electric Vehicle’.

En el siguiente modelo propuesto se incluye el elemento ‘IGBT’ de la librería SimPowerSystem junto con señal escalón ‘Step’ (Figura 2.6).

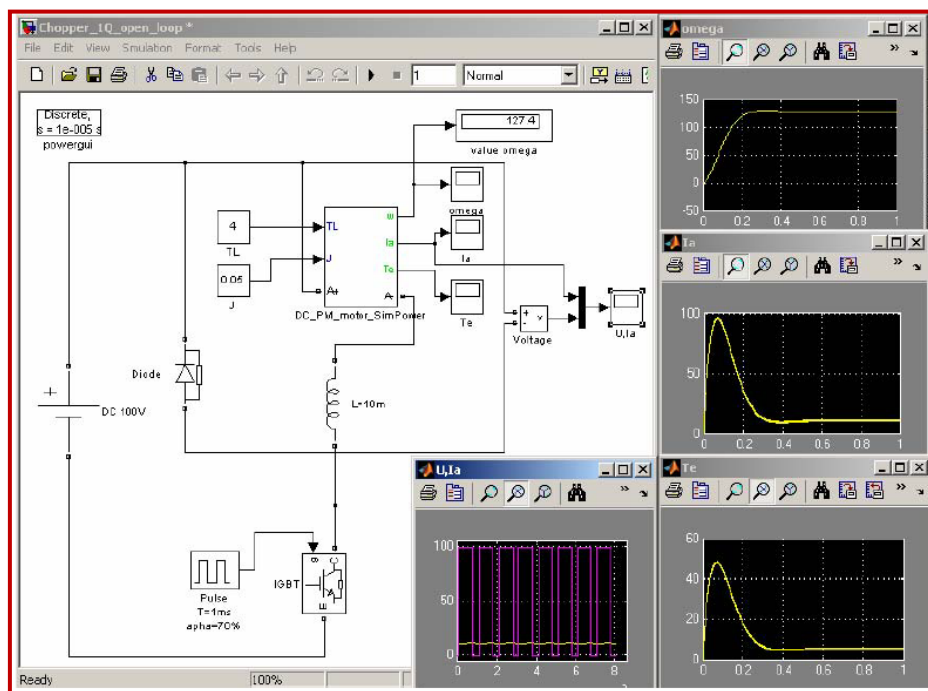


Figura 2.6. Segundo modelo propuesto en el artículo de referencia y simulaciones.

Como se observa en las Figuras 2.7 y 2.8, en el tercer y cuarto modelo propuesto se pretende el control de la velocidad y limitar los valores de intensidad de la armadura.

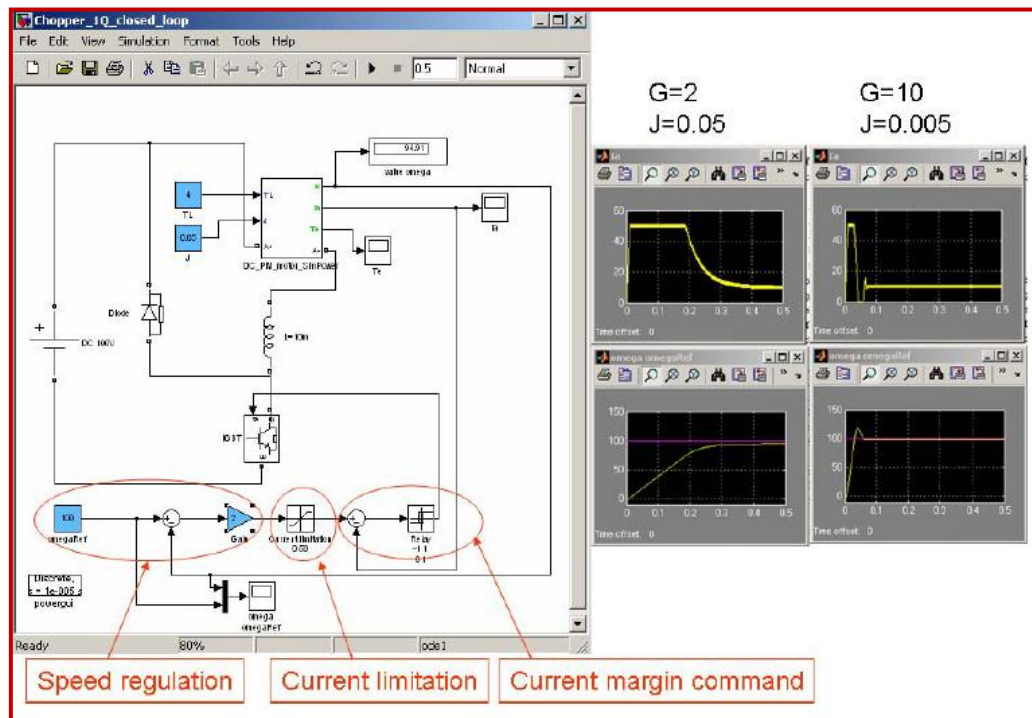


Figura 2.7. Tercer modelo propuesto en el artículo de referencia y simulaciones. Control velocidad y límite de intensidad.

La diferencia entre el tercer y cuarto modelo radica en el control aplicado de la velocidad, ya que en el tercer caso se limita a un valor constante de 100 rad/s , mientras que en el cuarto caso se limita a una señal que toma los valores $50, 100, 30 \text{ rad/s}$.

Se han llevado a cabo con cada modelo, dos simulaciones para un valor de momento de inercia J y ganancia G diferentes.

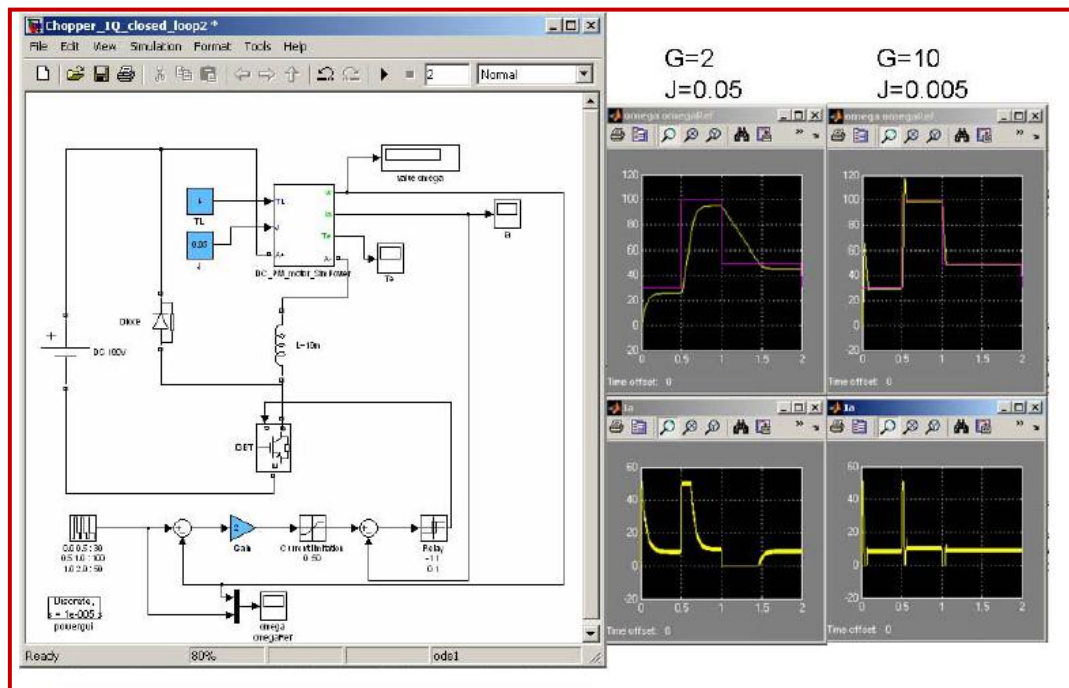


Figura 2.8. Tercer modelo propuesto en el artículo de referencia y simulaciones. Control velocidad y límite de intensidad.

El último modelo del artículo tomado como referencia para llevar a cabo las simulaciones de partida realizadas en el presente proyecto, incluye un controlador PID con las constantes proporcional, derivativa e integral que aparecen en la Figura 2.9.

Nótese que se han llevado a cabo dos simulaciones para distintos valores de momento de inercia y constantes del controlador PID.

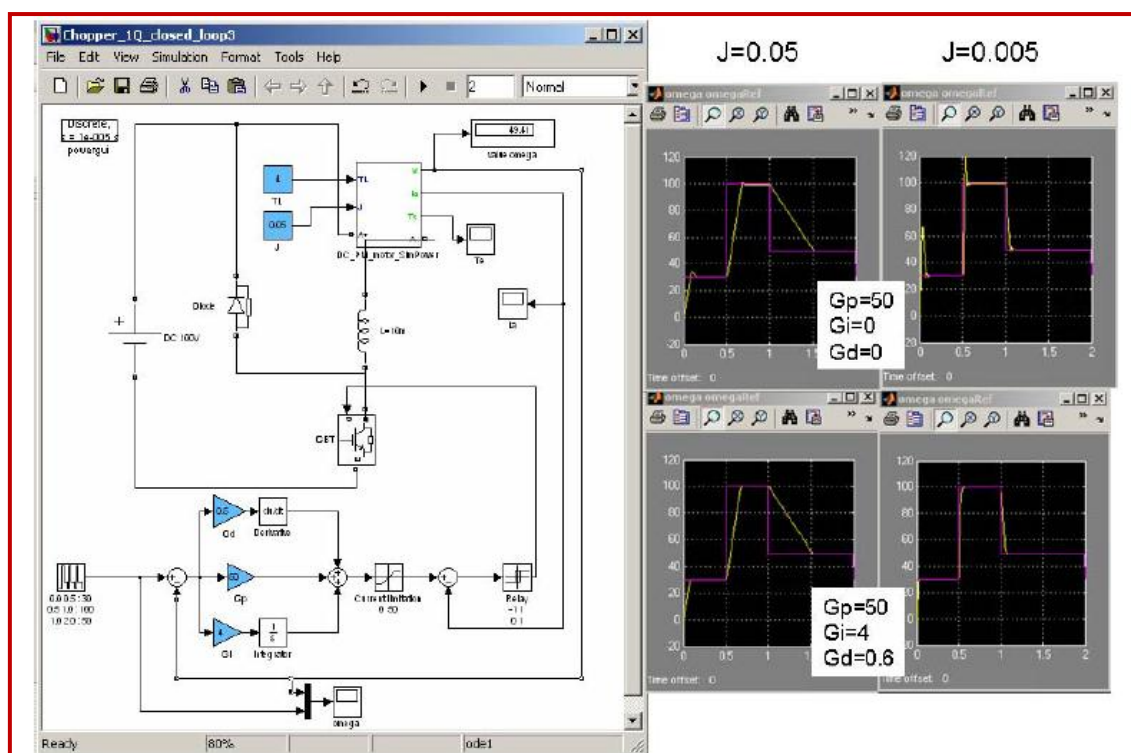


Figura 2.9. Tercer modelo propuesto en el artículo de referencia y simulaciones. Controlador PID.

2.4 Modelos de panel fotovoltaico propuestos en la bibliografía consultada.

Con respecto al modelo del panel fotovoltaico desarrollado por Simulink, se han seguido dos artículos donde se proponen dos modelos distintos.

A continuación se explican los modelos desarrollados en cada uno de los artículos de la bibliografía consultada.

2.4.1 Primer modelo para el panel fotovoltaico.

El primer modelo seguido es el presentado en el artículo '*A Photovoltaic Array Simulation Model for Matlab-Simulink GUI Environment*'.

Este modelo está basado en la ecuación que define la tensión de salida de la célula. Las ecuaciones que definen el modelo de panel fotovoltaico serán explicadas en el capítulo de este proyecto dedicado a la descripción del simulador.

Los datos de partida del modelo descrito en este artículo corresponden a:

- Fotointensidad, $I_{ph} \rightarrow 5A$
- Intensidad de saturación del diodo, $I_0 \rightarrow 0,0002 A$
- Resistencia en serie de la célula, $R_s \rightarrow 0,001 \Omega$
- Temperatura de referencia de operación de la célula, $T_c \rightarrow 20^{\circ}C$
- Constantes, γ_T y $\beta_T \rightarrow 0,06$ y $0,004$ respectivamente.

El diagrama de bloques del modelo PVA de Simulink es dado en la Figura 2.10. El bloque llamado 'PVA model' es la última etapa del modelo. Este bloque contiene dos submodelos (Figura 2.11 y 2.12) que son conectados para construir el modelo final. Un diodo (D1) es conectado en serie con el circuito de carga para prevenir la corriente de retorno. Un filtro es conectado antes de la carga para mantener la tensión estable. El filtro contiene una resistencia e inductancia R-L en serie, y una capacitancia C en paralelo. El PVA consiste en 8 células conectadas en serie para tener la tensión de salida deseada. Dependiendo de la potencia de carga requerida, el número de ramas en paralelo puede ser incrementado en dos o más. Los efectos de la temperatura y nivel de irradiación solar son representados por dos ganancias variables.

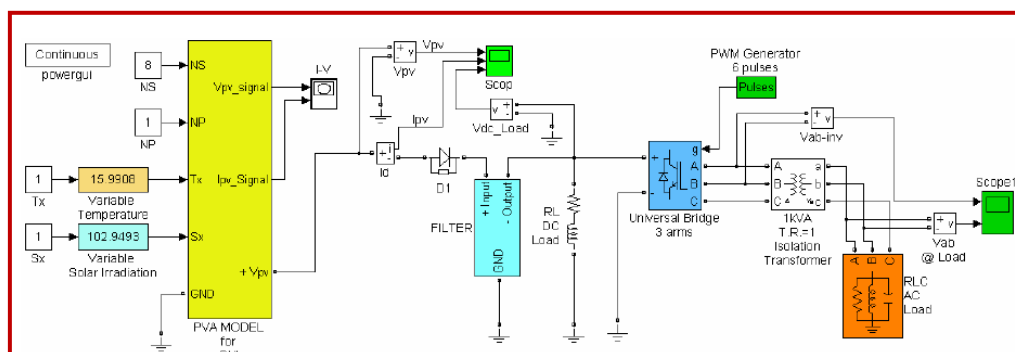


Figura 2.10. Diagrama de bloques del modelo PVA

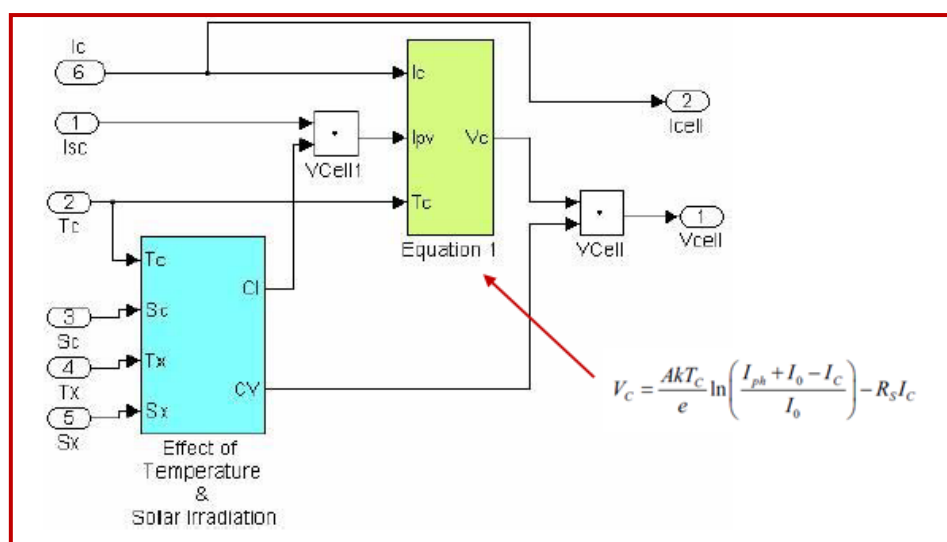


Figura 2.11. Modelo etapa 1.

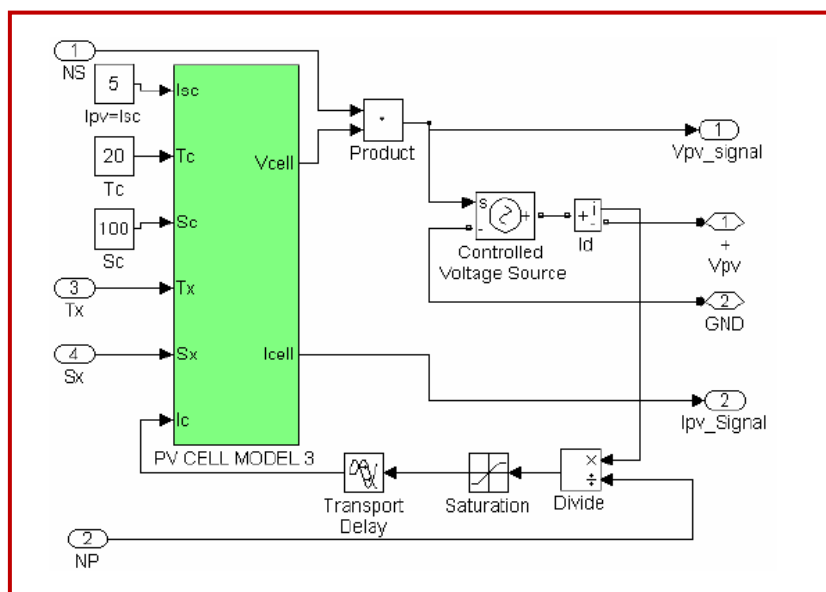


Figura 2.12. Modelo etapa 2.

El modelo PVA propuesto es simulado usando el esquema de la Figura 2.10. El sistema suministra potencia principalmente a una resistencia de carga continua y a un RLC de carga alterna con 500 W, 200 VAR inductivo y 500 VAR capacitivo. El sistema no tiene ningún controlador.

La característica Intensidad-Tensión ($I - V$) del PVA durante la operación es dada en la figura siguiente. La tensión es igual a la tensión de circuito abierto cuando la intensidad es igual a cero.

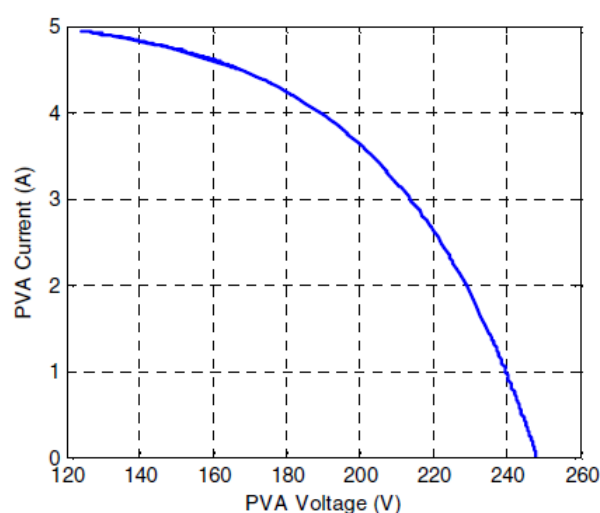


Figura 2.13. Característica Intensidad-Tensión (I-V) del PVA.

La potencia del PVA es dada en la figura 2.14. La máxima potencia está en torno a 750 W.

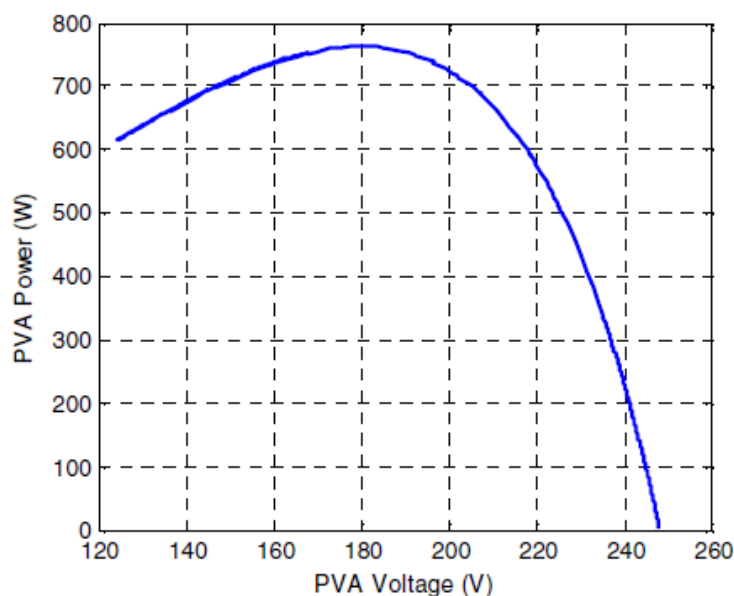


Figura 2.14. Característica Potencia-Tensión (P-V) del PVA.

2.4.2 Segundo modelo para el panel fotovoltaico.

El artículo ‘PV Module Simulink models’ es seguido para la creación del segundo modelo de panel fotovoltaico con Matlab-simulink.

Este modelo, a diferencia del planteado por el otro artículo, está basado en la ecuación que define la intensidad de la célula.

Para la creación de dicho modelo, se ha empleado un bloque ‘F(u)’ de la librería Simulink. Las entradas al bloque corresponden a la tensión del panel y nivel de irradiación solar, mientras que las salidas del bloque corresponden a la intensidad y potencia del panel fotovoltaico.

Los parámetros introducidos en el modelo del panel fotovoltaico aparecen en la Figura 2.15. Estos datos corresponden a los siguientes parámetros:

Intensidad de cortocircuito, $I_{sc} \rightarrow 5,45$ A

Tensión de circuito abierto, $V_{oc} \rightarrow 22,2$ V

Intensidad a potencia máxima, $I_R \rightarrow 4,95$ A

Tensión a potencia máxima, $V_R \rightarrow 17,2$ V

Parameters

Short-circuit current
5.45

Open-circuit voltage
22.2

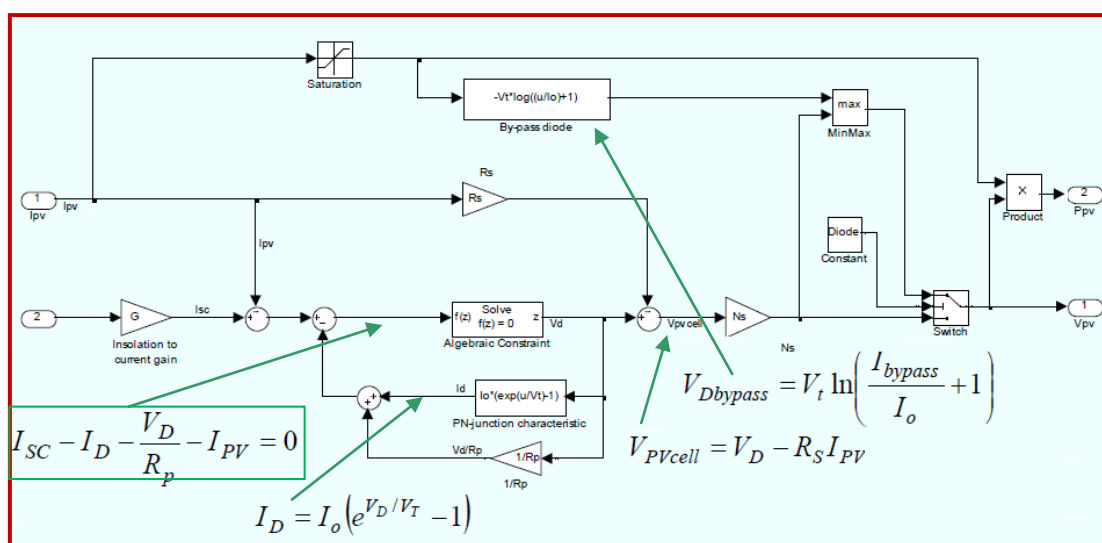
Current at Pmax
4.95

Voltage at Pmax
17.2

☒ By-pass diode?

Figura 2.15. Parámetros del modelo PV.

El subsistema creado a partir del bloque 'F(u)' de Simulink, aparece en la Figura 2.16. Las ecuaciones que se definen en dicho subsistema serán explicadas en el capítulo donde se describe el simulador de este proyecto.



El modelo final propuesto en este artículo aparece en la Figura 2.17. Este modelo se ha llevado a cabo para diferentes valores de irradiación solar (200, 400, 600, 800 y 1000 W/m²).

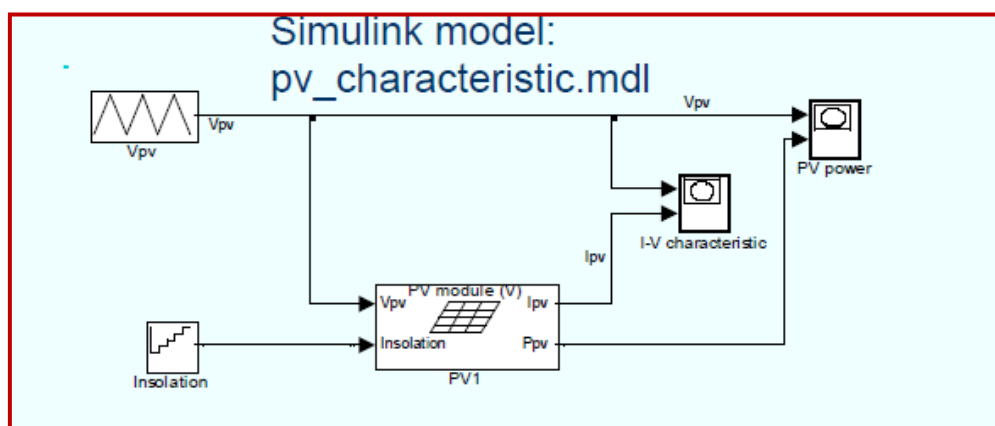


Figura 2.17. Esquema en Matlab-Simulink del modelo propuesto en este artículo.

La característica Intensidad-Tensión y Potencia-Tensión para los diferentes niveles de irradiación solar obtenidos del modelo presentado en la Figura 2.17, aparece en la Figura 2.18.

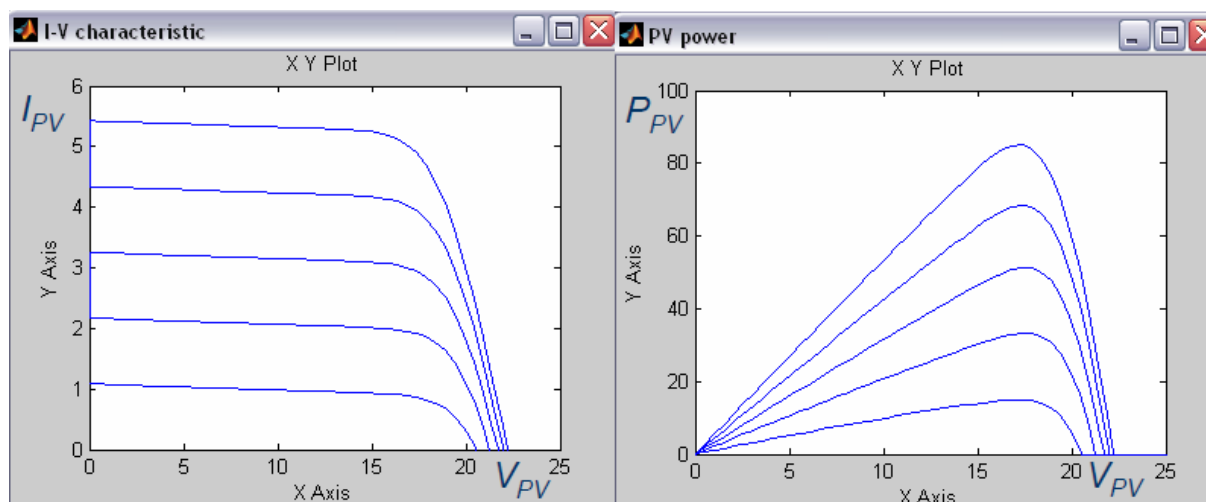


Figura 2.18. A la izquierda 'Característica Intensidad-Tensión'. A la derecha 'Característica Potencia-Tensión' del modelo presentado en este artículo.

CAPÍTULO 3.

CASO DE ESTUDIO.

3. DEFINICIÓN DEL CASO DE ESTUDIO.

3.1 Introducción al caso de estudio.

Como se explica en el primer apartado, el objeto de modelizar el motor de corriente continua de imanes permanentes (PMDC) es poder disponer de un modelo que defina el comportamiento del motor similar al del vehículo ‘Aníbal’.

El vehículo ‘Aníbal’ es un **coche solar** propulsado por un motor eléctrico alimentado por energía solar obtenida de paneles solares en la superficie del automóvil. Las celdas fotovoltaicas convierten la energía del sol directamente en electricidad, que puede o bien ser almacenada en baterías eléctricas o ser utilizada directamente por el motor.

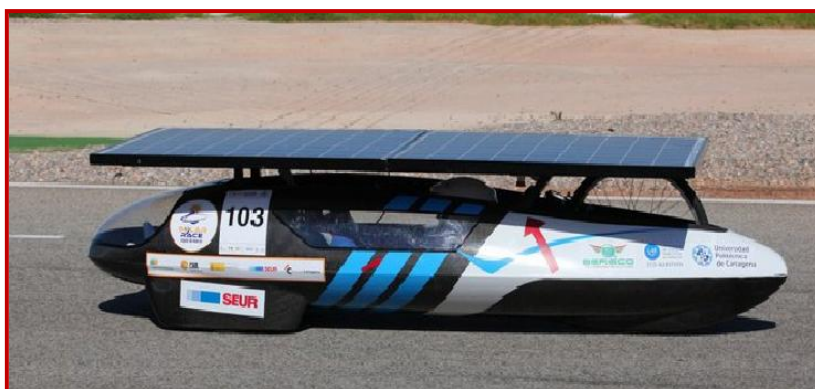


Figura 3.1. Vehículo solar prototipo ‘Aníbal’.

El motor de corriente continua de imanes permanentes (PMDC) es uno de los tipos de motores de continua utilizado con frecuencia en sistemas de propulsión. El circuito equivalente de un motor PMDC se muestra en la Figura 3.2.

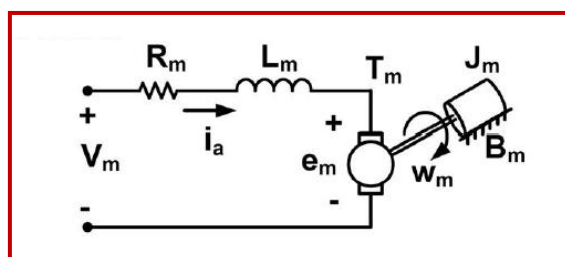


Figura 3.2. Circuito equivalente de un motor de continua.

Cada uno de los parámetros y símbolos que aparecerán en la simulación del sistema que es objeto de estudio, están especificados en la Tabla 3.1. Estos datos han sido extraídos de la bibliografía que se ha tomado como referencia en este proyecto por la proximidad del funcionamiento de dicho motor.

Tensión de fuente	V_m	36 V
Inductancia	L_m	3 mH
Resistencia	R_m	0,15 Ω
Constante de tensión	K_e	0,2 V · s/rad
Par electromagnético	T_e	Nm
Factor de ponderación de la velocidad del motor	γ_w	10
Factor de ponderación de la corriente del motor	γ_I	0.1
Factor de ponderación de la potencia del motor	γ_p	1
Constante proporcional	G_p	150
Constante integral	G_i	5
Constante derivativa	G_d	2
Constante del par de la carga	K_0	0.9
	K_1	$3,9 \cdot 10^{-3}$
	K_2	$66 \cdot 10^{-6}$
Constante de fricción viscosa	B_0	$5,7 \cdot 10^{-3}$
	B_1	$25 \cdot 10^{-6}$

	B_2	$0,423 \cdot 10^{-6}$
Constante de momento de inercia del motor	J_0	$14,44 \cdot 10^{-3}$
	J_1	$62,6 \cdot 10^{-6}$
	J_2	$1,06 \cdot 10^{-6}$
Número de celdas en serie	NS	2
Número de celdas en paralelo	NP	1
Nivel de irradiación solar	SX	$102,9493 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$
Nivel de temperatura	TX	$15,9908 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Tabla 3.1. Parámetros del sistema de estudio.

En los siguientes apartados se explicarán detalladamente el funcionamiento del motor de continua de imanes permanentes y del panel fotovoltaico, junto con las ecuaciones que definen el comportamiento de ambos sistemas.

3.2 Bloque motor.

3.2.1 Introducción al motor para el vehículo eléctrico.

Uno de los elementos fundamentales en un vehículo eléctrico es su motor, que debe ser capaz de suministrar par en forma uniforme, controlada y eficiente. Para satisfacer esta necesidad, existe una amplia gama de alternativas. Entre las mismas se incluyen los motores DC, de inducción, síncronos, de reluctancia y paso a paso, los que a su vez tienen sus variantes particulares.

En la Figura que sigue, se ilustran estas alternativas ordenadas según el tipo de motor.

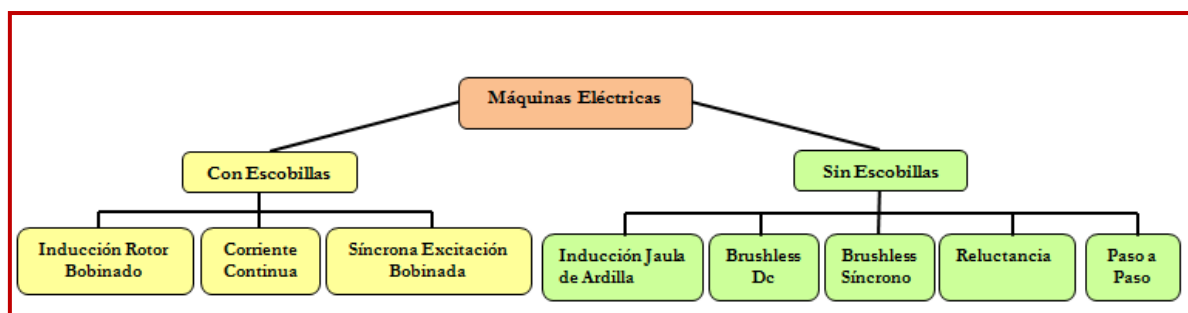


Figura 3.3. Tipos de máquinas eléctricas.

En la mayoría de las aplicaciones ‘hoy en día’ se prefieren las máquinas *sin escobillas*, puesto que presentan mayores ventajas frente a las máquinas con escobillas. Éstas destacan frente a las máquinas con escobillas por algunos aspectos tales como:

- ✓ Robustez
- ✓ Altos torques
- ✓ Amplio rango de velocidad
- ✓ Baja mantención

Dentro de la categoría sin escobillas, se encuentran las máquinas de inducción jaula de ardilla, imanes permanentes y de reluctancia. De estos tres tipos máquina sin escobillas, las de imanes permanentes (PMDC) se presentan como las más atractivas.

Algunas de las características de los PMDC por los que se presenta como mejor alternativa frente al resto de motores sin escobillas, se detallan a continuación:

- Eficiencias eléctricas superiores a las demás, sobrepasando el 95 %.
- Esto se da como consecuencia de eliminar las bobinas de campo y ser reemplazarlas por imanes permanentes.
- Razón potencia- peso mayor que la de los otros dos motores mencionados.
 - Inercia más baja y, por tanto, respuesta más rápido ante cambios en el par.
 - Requiere de inversores de menor tamaño al no requerir una corriente de magnetización

Por otro lado, el motor de inducción presenta algunas ventajas frente a las máquinas de imanes permanentes. Algunas de éstas son:

- ✓ Amplio rango de debilitamiento de campo
- ✓ Torque muy constante
- ✓ Menor costo
- ✓ Mayor capacidad de sobrecarga y sobrecalentamiento

El motor con el que hemos trabajado en este proyecto, es el de imanes permanentes (PMDC), por las ventajas que supone su utilización en los vehículos eléctricos. Este motor es de corriente continua, por ello, en el siguiente apartado se hace una introducción de la máquina de corriente continua de forma general, especificando las partes que constituyen la misma y los tipos de máquinas en función de la excitación.

3.2.2 Máquina de corriente continua.

Los motores de corriente continua tienen varias particularidades que los hacen muy diferentes a los de corriente alterna. Una de las principales particularidades es que pueden funcionar a la inversa, es decir, no solamente pueden ser usados para transformar la energía eléctrica en energía mecánica, sino que también pueden funcionar como generadores de energía eléctrica debido a que tienen la misma constitución física.

En comparación a los motores de corriente alterna, los motores de corriente continua tienen un par de arranque alto y también se puede controlar con mucha facilidad la velocidad de los mismos.

Por estos motivos, los motores de corriente continua son ideales para funciones que requieran un control de velocidad.

En los motores de corriente continua se distinguen fundamentalmente dos partes: devanado inductor (o excitador) y devanado inducido.

Devanado inductor o excitador

El devanado del inductor está localizado en el estator, al que se aplica una corriente continua que genera un campo magnético definido por el vector inducción magnética B .

Devanado inducido

El devanado del inducido localizado en el rotor, al que se aplica una corriente continua y en el que se genera una fuerza electromagnética con la siguiente expresión:

$$F = L \cdot I \cdot E \quad (3.1)$$

El par que experimenta el eje del rotor viene dado por la expresión que sigue:

$$T = K \cdot I_i \cdot \varphi \quad (3.2)$$

Siendo:

- I_{ind} es la corriente que recorre el devanado del inducido
- φ es el flujo magnético generado en el inductor, el cual se define según la ecuación siguiente y es proporcional a la corriente que recorre el devanado del inductor I_A .

$$\varphi = K' \cdot I_A \quad (3.3)$$

Sustituyendo la expresión del flujo magnético definida en la expresión (3.3) en la ecuación (3.2), se obtiene otra definición para el par que experimenta el eje del rotor:

$$T = K'' \cdot I_{ind} \cdot I_A \quad (3.4)$$

Siendo K , K' y K'' constantes.

Por otro lado, el movimiento del rotor genera una fuerza contraelectromotriz (E'_A) que representa el consumo de energía eléctrica por unidad de carga del motor, la cual, depende de la velocidad de giro del rotor y del flujo magnético creado en el inductor según la expresión siguiente:

$$E'_A = K \cdot w \cdot \varphi \quad (3.5)$$

3.2.2.1 Elementos que constituyen las máquinas de corriente continua.

El motor de corriente continua está compuesto principalmente por el rotor (o inducido) y el estator (o inductor). En la Figura 3.4 se representan el esquema desglosado de los elementos que constituyen de forma general, cualquier tipo máquina de corriente continua.

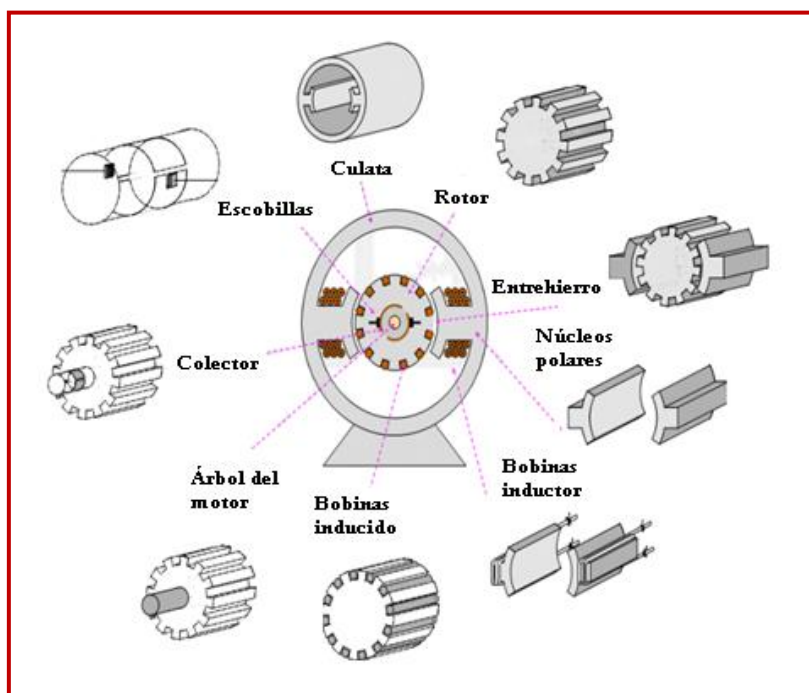


Figura 3.4. Esquema desglosado de los componentes de la máquina de corriente continua.

El rotor constituye la parte móvil del motor y proporciona el par para mover la carga. En la Tabla 3.2 se describen cada uno de los elementos que constituyen el rotor.

ELEMENTOS DEL ROTOR	
Eje	Éste está formado por una barra de acero fresada y es el que imparte la rotación al núcleo, devanado y colector.

Núcleo	<p>Se localiza sobre el eje, fabricado con capas laminadas de acero y cuya función es proporcionar un trayecto magnético entre los polos.</p> <p>Las laminaciones tienen por objeto reducir las corrientes parásitas en el núcleo, por tanto, el acero del núcleo debe ser capaz de mantener bajas las pérdidas por histéresis.</p> <p>Este núcleo laminado contiene ranuras a lo largo de su superficie para albergar al devanado de la armadura (bobinado).</p>
Devanado de la armadura (o inducido)	<p>Consta de bobinas aisladas entre sí y entre el núcleo de la armadura. Estas bobinas están alojadas en las ranuras, y están conectadas eléctricamente con el colector, el cual debido a su movimiento rotatorio, proporciona un camino de conducción conmutado</p>
Colector	<p>El colector, denominado también conmutador, está constituido de láminas de material conductor (delgas), separadas entre sí y del centro del eje por un material aislante, para evitar cortocircuito con dichos elementos.</p> <p>El colector se encuentra sobre uno de los extremos del eje del rotor, de modo que gira con éste y está en contacto con las escobillas.</p> <p>La función del colector es recoger la tensión producida por el devanado del inducido, transmitiéndola a la batería por medio de las escobillas (llamadas también cepillos).</p>

Tabla 3.2 Elementos que constituyen el rotor de la máquina de corriente continua.

El estator constituye la parte fija de la máquina y está constituido por el armazón (o carcasa) y el imán permanente según se describe en la Tabla 3.3.

ELEMENTOS DEL ESTATOR	
Armazón o carcasa	<p>El armazón tiene como funciones primordiales servir como soporte y proporcionar una trayectoria de retorno al flujo magnético del rotor y del imán permanente para completar el circuito magnético.</p>

Imán permanente	<p>El imán permanente está compuesto de material ferromagnético altamente remanente y se encuentra fijado al armazón o carcasa del estator.</p> <p>La función de éste, es proporcionar un campo magnético uniforme al devanado del rotor o armadura, de modo que interactúe con el campo formado por el bobinado, y se origine el movimiento del rotor como resultado de la interacción de estos campos.</p>
------------------------	--

Tabla 3.3 Elementos que constituyen el rotor de la máquina de corriente continua.

3.2.2.2 Clasificación de las máquinas de corriente continua.

Las características de las máquinas de corriente continua dependen en gran medida en la forma en que se alimentan los devanados inductor e inducido, en consecuencia, cabe clasificar las máquinas de corriente continua (indistintamente de que funcionen como motor o como generador) en las siguientes categorías: excitación en derivación, excitación separada, excitación serie, excitación compuesta y de imanes permanentes.

El campo magnético de la máquina de corriente continua puede generarse mediante **imanes permanentes**, o con **bobinas alimentadas con corriente continua**. Según la forma de alimentación de las bobinas se distinguen dos tipos de excitación:

- Excitación independiente

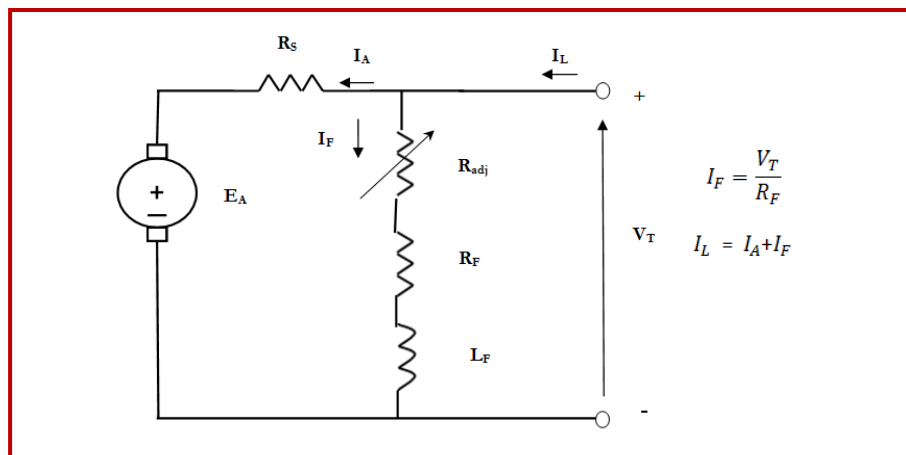
En este caso la corriente que alimenta al devanado inductor es ajena a la propia máquina, es decir, procede de una fuente independiente externa (Figura 3.8).

- Autoexcitación.

En este caso la corriente de excitación procede de la propia máquina. A este grupo pertenecen las máquina de excitación serie, excitación derivación y excitación compuesta (Figuras 3.5, 3.9, 3.11).

3.2.2.2.1 Máquina DC de excitación en derivación.

El motor DC en derivación es un motor cuyo circuito de campo es alimentado por una fuente de potencia separada de voltaje constante (Figura 3.5).



3.5. Excitación en derivación: devanado inductor conectado directamente a las escobillas, por tanto, en paralelo con el inducido.

Este motor es aquel cuyo circuito de campo obtiene su potencia directamente de los terminales del inducido del motor. Si se supone que el voltaje de alimentación a las dos máquinas es constante, no hay apenas diferencia de comportamiento entre las dos máquinas.

La ecuación correspondiente a la ley de voltajes de Kirchhoff para el motor DC en derivación es:

$$V_T = E_A + I_A \cdot R_A \quad (3.6)$$

La característica par-velocidad de los motores de derivación representa una línea recta con pendiente negativa, esto significa que conforme aumenta el par inducido, disminuye la velocidad del motor (Figura 3.6).

La velocidad del motor viene dada según la expresión siguiente:

$$w = \frac{V_T}{K \cdot \phi} - \frac{R_A}{(K \cdot \phi)^2} \cdot T_{ind} \quad (3.7)$$

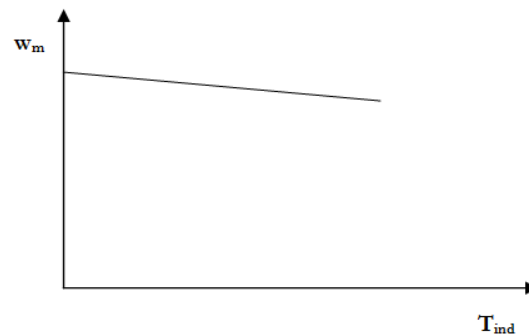


Figura 3.6 Características par-velocidad de un motor dc en derivación o de un motor dc con excitación separada, y devanados de compensación para eliminar la reacción del inducido.

Los otros términos de la expresión (3.7) deben permanecer constantes cuando cambia la carga, para la variación lineal de la velocidad del motor con respecto al par.

La reacción del inducido es otro efecto interno del motor que también afecta a la forma de la curva par-velocidad. Si un motor presenta reacción del inducido, el efecto de debilitamiento del flujo reduce el flujo en la máquina a medida que aumenta la carga (Figura 3.7).

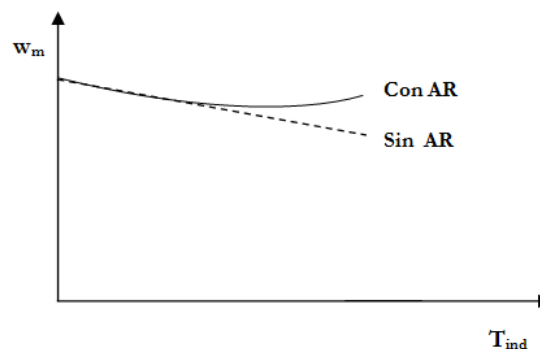
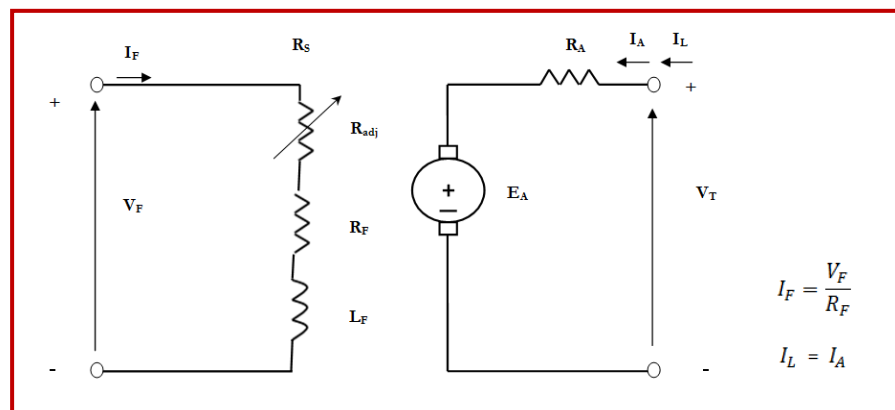


Figura 3.7 Características par-velocidad del motor dc, con reacción del inducido presente.

3.2.2.2.2 Máquina DC de excitación separada.

El motor con excitación separada es un motor cuyo circuito de campo es alimentado por una fuente de potencia separada de voltaje constante (Figura 3.8). Si se supone que el voltaje de alimentación a la máquina de excitación separada y en derivación es constante, no hay apenas diferencia de comportamiento entre ambas. Por tanto, definido el comportamiento de un motor en derivación queda definido el comportamiento de un motor de excitación separada.

Dado que en este motor el estator y el rotor no están conectados entre sí, se dice que la máquina funciona con excitación independiente.



3.8. Excitación separada o independiente.

3.2.2.2.3 Máquina DC de excitación en serie.

El motor de excitación en serie es aquel cuyo devanado de campo relativamente consta de unas pocas vueltas conectadas en serie con el circuito del inducido (Figura 3.9).

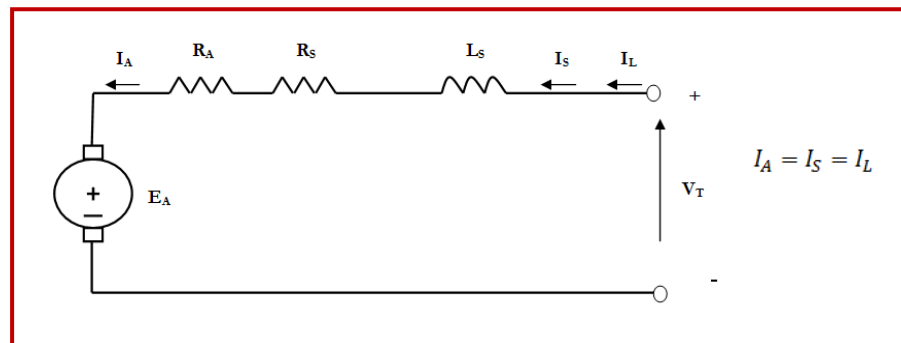


Figura 3.9. Excitación en serie: el devanado inductor en serie con el inducido.

En un motor de este tipo, la corriente del inducido, la corriente de campo y la corriente de línea son iguales.

La ecuación correspondiente a la ley de voltajes de Kirchhoff para este motor es:

$$V_T = E_A + I_A \cdot (R_A + R_S) \quad (3.8)$$

El par inducido es directamente proporcional al cuadrado de la corriente del inducido.

$$T_{\text{ind}} = K \cdot \varphi \cdot I_A = K \cdot K' \cdot I_A^2 \quad (3.9)$$

Por tanto, este motor produce más par por amperio que cualquier otro motor DC. El motor de serie se utilizará en aplicaciones que requieran un par alto, tal como los motores de arranque de vehículos automotores, motores de elevadores y motores de tracción en locomotoras.

La característica par-velocidad de un motor DC en serie (ecuación 3.10) presenta una desventaja de inmediato en este tipo de motores. Así cuando el par de este motor tiende a cero, su velocidad tiende a infinito (Figura 3.10).

$$W = \frac{V_T}{\sqrt{K \cdot K'}} \cdot \frac{1}{\sqrt{T_{ind}}} - \frac{R_A + R_S}{K \cdot K'} \quad (3.10)$$

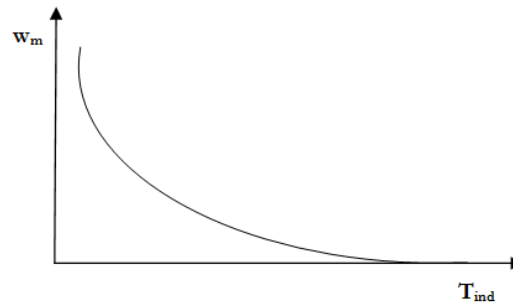
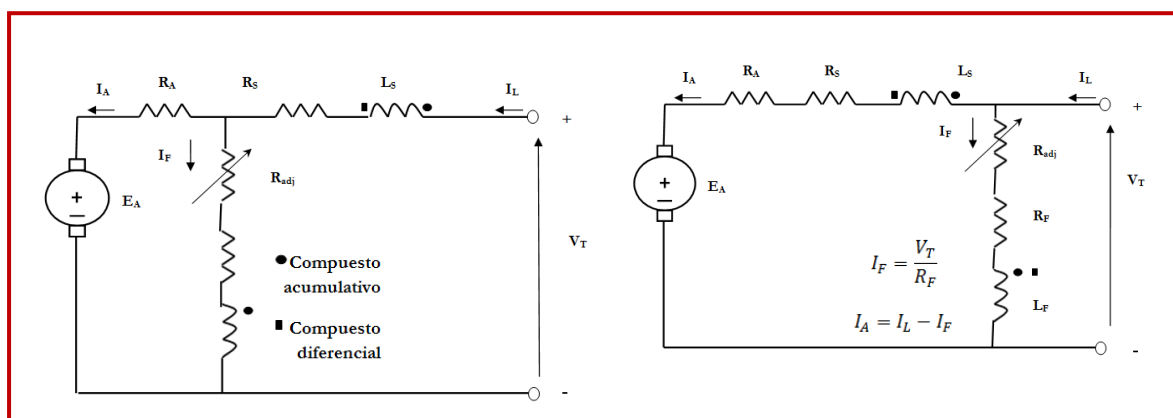


Figura 3.10 Características par-velocidad del motor DC serie.

3.2.2.2.4 Máquina DC de excitación compuesta.

El motor dc de excitación compuesta es aquel que tiene campo en derivación y campo en serie (Figura 3.11).



3.11. Excitación compuesta: una bobina en serie y la otra en paralelo. A la izquierda conexión en derivación larga y a la derecha conexión en derivación corta.

Los puntos marcados en las dos bobinas de campo tienen el mismo significado que los marcados en un transformador: la corriente que fluye hacia dentro, por el punto, produce una fuerza magnemotriz positiva. Si la corriente fluye hacia dentro por los puntos marcados por las dos bobinas de campo, las fuerzas magnemotrices resultante se suman para producir una fuerza magnemotriz total mayor. Esta situación se conoce como composición acumulativa. Si la corriente de una bobina de campo sale por el punto, mientras que la corriente de la otra bobina de campo sale por el punto, las fuerzas magnemotrices se restan.

La ecuación correspondiente a la ley de voltajes de Kirchhoff para este motor es la definida en la ecuación (3.8).

En el motor compuesto acumulativo hay una componente del flujo que es constante y otro que es proporcional a la corriente del inducido. Por consiguiente, este motor tiene un par de arranque mayor que un motor en derivación (cuyo flujo es constante) pero menor que un motor en serie (cuyo flujo es proporcional a la corriente del inducido) (Figura 3.12).

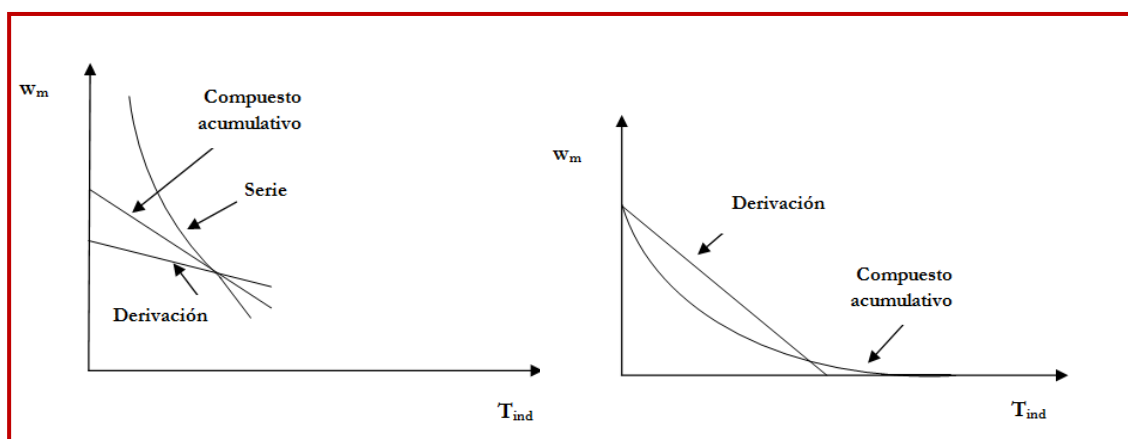


Figura 3.12. A la izquierda característica par-velocidad de un motor dc compuesto acumulativo, comparado con los motores serie y derivación de la misma capacidad a plena carga. A la derecha característica par velocidad de un motor dc compuesto acumulativo, comparado con un motor en derivación con la misma velocidad en vacío.

3.2.2.2.5 Máquina DC de imanes permanentes.

A lo largo de todo el proyecto nos venimos refiriendo a un motor de continua de imanes permanentes, es decir, aquel motor en el que la excitación se consigue con un imán permanente.

La principal característica de este tipo de máquina es que no posee bobinas de excitación en el rotor, siendo éstas reemplazadas por imanes permanentes.

Como ya se mencionó al principio de este apartado, este motor no está constituido de anillos ni escobillas, lo cual supone una ventaja, ya que no necesitará la mantención. Además, este tipo de motor, es menos susceptible a sufrir recalentamientos ya que los enrollados se encuentran solo en la parte externa del motor (es decir en el estator). Por ello, la refrigeración será más simple, pudiendo ser enfriado simplemente por aire.

Un motor de imán permanente es básicamente la misma máquina que un motor dc en derivación, excepto que el flujo de un motor PMDC es fijo. Por tanto, no es posible controlar la velocidad de un motor PMDC variando la corriente o el flujo de campo. Los únicos métodos de control de la velocidad disponibles para un motor DC de imanes permanentes, son el control del voltaje del inducido y control de la resistencia del inducido.

En algunas aplicaciones, los motores de imanes permanente ofrecen muchos más beneficios que los motores DC en derivación. De este modo, como los motores de imanes permanentes no requieren de un circuito de campo externo, no tienen las pérdidas de cobre del circuito de campo asociadas a los motores DC en derivación.

Los motores PMDC son muy comunes en tamaños pequeños de caballaje fraccional y subfraccional, en los cuales no puede justificarse el costo y espacio de un circuito separado de campo.

Sin embargo, los motores PMDC tienen algunas desventajas debido a que los imanes permanentes no pueden producir tan alta densidad de flujo, como la de un campo externo en derivación. En consecuencia, el motor PMDC tendrá un par inducido por amperio de corriente del inducido, menor que el de un motor en derivación del mismo tamaño y construcción.

En este tipo de máquina se ha observado un proliferamiento debido al desarrollo de mejores imanes. Algunas características esenciales de los imanes permanentes se describen a continuación:

- **Densidad de flujo remanente B_r**

La densidad de flujo remanente, es una medida de la fuerza de atracción o repulsión que ejerce el imán. Este parámetro es medido en Tesla o kiloGauss (1 Tesla = 10 kiloGauss).

- **Coercitividad**

La coercitividad corresponde a la capacidad de resistir la desmagnetización. Esta se mide a través de la fuerza coercitiva H_c y sus unidades de medida son los kiloOersted.

- **Temperatura de Curie T_c**

La temperatura de Curie es aquella a la que el imán pierde sus propiedades magnéticas.

- **Producto de energía máximo BH_{max}**

El producto de la energía máximo es representado por el rectángulo más grande que puede inscribirse en el cuadrante B+ H- de la curva de magnetización del imán.

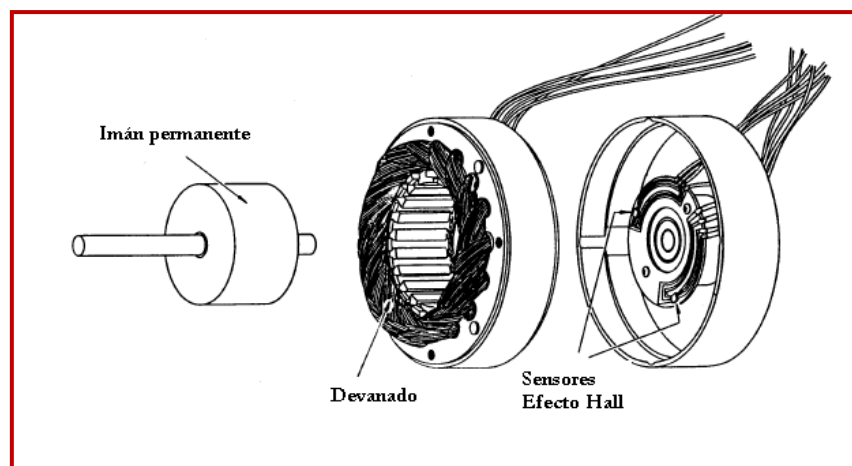


Figura 3.13 Motor de corriente continua de imanes permanentes (Brushless).

En la Figura 3.14 se muestra una curva de magnetización para un material ferromagnético típico. Es un dibujo de la densidad de flujo B contra la intensidad de campo H . Cuando se aplica a este material una fuerza magnemotriz externa fuerte y luego se quita, un flujo residual B_{res} permanecerá en el material. Para que el flujo residual sea cero, es necesario aplicar una intensidad magnetizante coercitiva H_c con una polaridad opuesta a la polaridad de la intensidad magnetizante H que al principio originó el campo magnético.

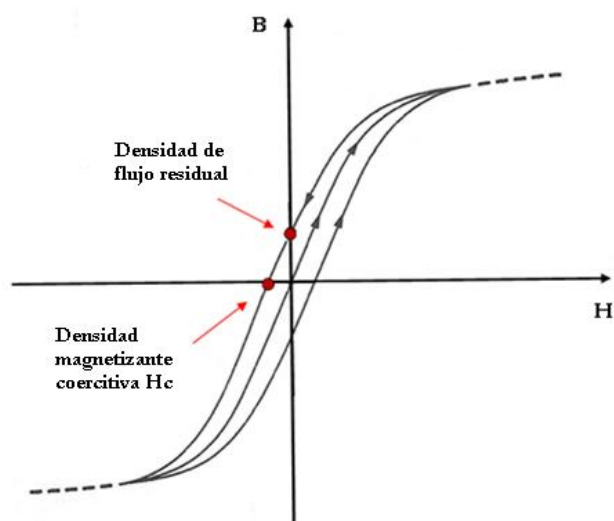


Figura 3.14 Curva de magnetización de un material ferromagnético típico.

Por otra parte, un buen material para fabricar los polos de un motor PMDC deberá tener tanto mayor densidad de flujo residual (B_{res}) posible como la mayor intensidad magnetizante coercitiva (H_c) posible. La curva de magnetización de este material se muestra en la Figura 3.15. La B_{res} grande produce un gran flujo en la máquina, mientras que la H_c grande indica que se requeriría una gran corriente para desmagnetizar los polos.

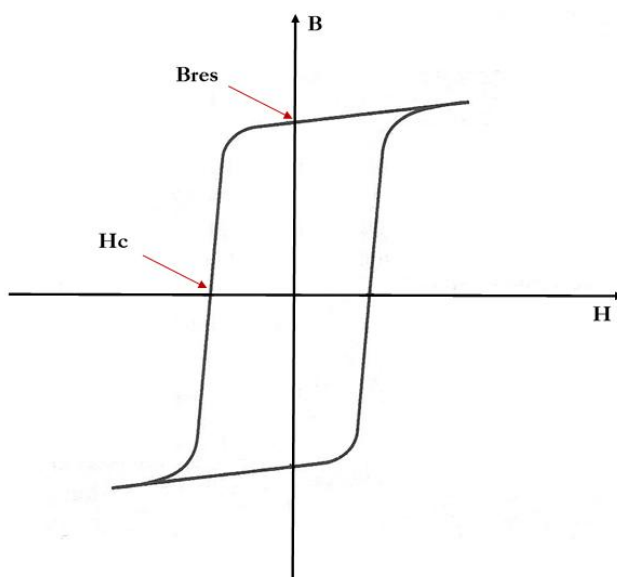


Figura 3.15 Curva de magnetización de un material ferromagnético adecuado para ser utilizado en imanes permanentes.

En la Tabla 3.4 se muestran los valores característicos de algunas familias de imanes permanentes, entre los que se destacan los ‘*Alnicos*’, las ‘*Ferritas*’ y los ‘*REPMs*’.

Los Alnicos (aleación de Aluminio, Níquel y Cobalto), presentan muy baja coercitividad, por lo que no son aplicables a motores de tracción.

Las Ferritas (materiales cerámicos) de valores de coercitividad y remanencia medianos, son utilizadas en motores industriales por su bajo costo, pero a costa de un peso excesivo.

Finalmente los REPMs (Rare Earth Permanent Magnet) o imanes de “Tierras Raras”, son los únicos utilizados en motores para vehículos eléctricos, pues son magnéticamente muy poderosos y permiten fabricar motores de imanes permanentes muy livianos. Dentro de los imanes REPM existen dos tipos de familias: los en base a Samario y los en base a Neodimio. Estos dos elementos químicos pertenecen a la familia de los “Lantánidos” o de las “Tierras Raras”, de donde deriva el nombre de estos importantes imanes.

El Samario forma imanes muy poderosos con el Cobalto, en tanto que el Neodimio lo hace con el Hierro y el Boro. Los imanes de Samario-Cobalto más importantes son los del tipo ‘1-5’ y 2-17, en tanto que los de Neodimio-Hierro-Boro conforma el imán tipo ‘2-14-1’. Estos números son relaciones en peso de los elementos constituyentes, en el orden en que se han presentado en este texto. Por ejemplo ‘1-5’ significa que el imán se forma por una unidad en peso de Samario y 5 unidades en peso de Cobalto.

Familia	Tc (°C)	Br (kG)	Hc (kOe)	Bhmax (MGOe)	Temp. Oper. (°C)
Alnico					
▪ Alnico 2	700-850	7,2	0,54	1,6	300
▪ Alnico 5					
▪ Alnico 8	700-850	13,5	0,75	7,5	300
Ferritas					
▪ Ceramic 8	700-850	7,5	1,9	5	300
REPM					
▪ 1-5	450	3,8	2,9	4	150
▪ 2-17					
▪ 2-14-1					
	650	5-10	5-25	6-26	250

43

El par de la carga viene dado por:

$$Tl = K_0 + K_1 \cdot \omega_m(t) + K_2 \cdot \omega_m(t)^2 \quad (3.15)$$

Tanto B y J son funciones no lineales de la velocidad, y sus expresiones son:

$$B = B_0 + B_1 \cdot \omega_m(t) + B_2 \cdot \omega_m(t)^2 \quad (3.16)$$

$$J = J_0 + J_1 \cdot \omega_m(t) + J_2 \cdot \omega_m(t)^2 \quad (3.17)$$

Donde: $K_0, K_1, K_2, B_0, B_1, B_2, J_0, J_1, J_2$, son coeficientes conocidos.

3.2.4 Definición de las curvas de velocidad angular, intensidad de la armadura y par en función del tiempo para el caso de estudio.

Antes de llevar a cabo las simulaciones mediante los modelos propuestos en Matlab-simulink, en este apartado se va a programar con el editor de Matlab, el sistema de ecuaciones diferenciales que definen el funcionamiento del motor (ecuaciones (3.18) y (3.19)), con el objeto de tener una idea de partida del comportamiento de la velocidad angular, intensidad de la armadura y par del motor a lo largo del tiempo.

El sistema de ecuaciones diferenciales es el resultante de sustituir las ecuaciones (3.14), (3.15), (3.16) y (3.17) junto con otros parámetros conocidos (coeficientes y constantes) en las ecuaciones (3.11) y (3.13).

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dI_a(t)}{dt} = 12000 - 66,67 \cdot \omega_m(t) - 50 \cdot I_a(t) \quad (3.18) \\ \frac{d\omega_m(t)}{dt} = \frac{0,2 \cdot I_a(t) - 0,9 - 0,0096 \cdot \omega_m(t) - 0,000085 \cdot \omega_m(t)^2 - 0,000000423 \cdot \omega_m(t)^3}{0,01444 + 0,0000626 \cdot \omega_m(t) + 0,00000106 \cdot \omega_m(t)^2} \quad (3.19) \end{array} \right.$$

Donde las incógnitas del sistema de ecuaciones son $I_a(t)$ y $\omega_m(t)$

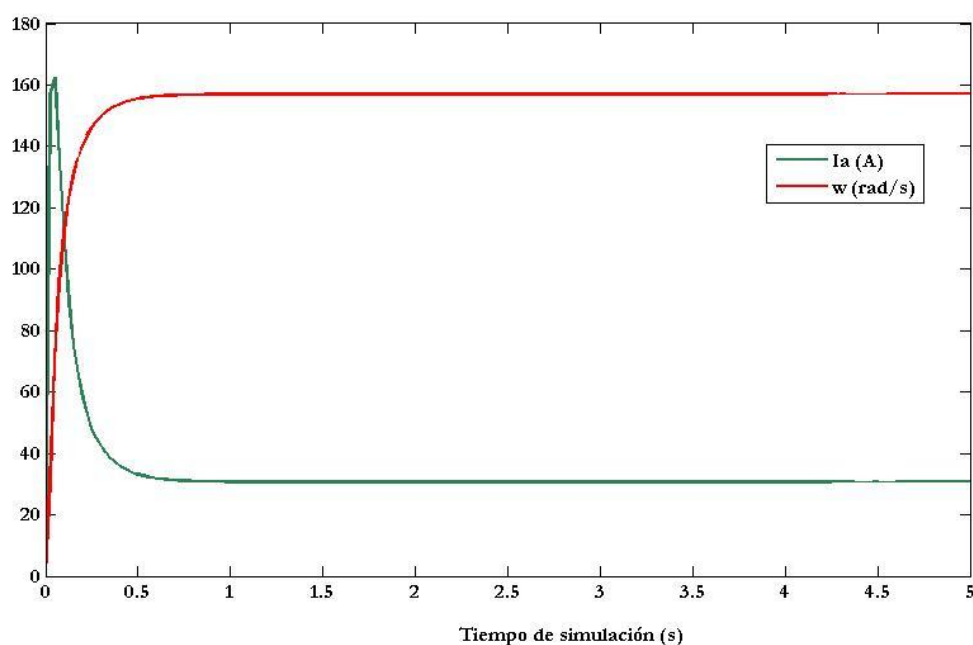
Este sistema de ecuaciones diferenciales es no lineal y de primer orden, por consiguiente, puede ser resuelto por el Método iterativo Runge-kutta de cuarto orden.

Como se ha dicho anteriormente, se ha optado por programar dicha resolución del sistema de ecuaciones con el programa Matlab, elaborando un código en el editor del mismo denominado *ecuacionesmotor1.m*.

En dicho código se ha aplicado el método Runge –kutta tomando un paso $h = 0,025$, y para un tiempo ' t ' comprendido entre 0 y 5 segundos.

Las condiciones iniciales para el sistema de ecuaciones son: $I_a(0) = 0$ y $\omega_m(0) = 0$

Los resultados que se obtienen con la programación de dicho código, se muestran en la Gráfica 3.1. En esta gráfica, se representa la intensidad de la armadura ' $I_a(t)$ ' y la velocidad angular del rotor ' $\omega_m(t)$ ' en función del tiempo de simulación.

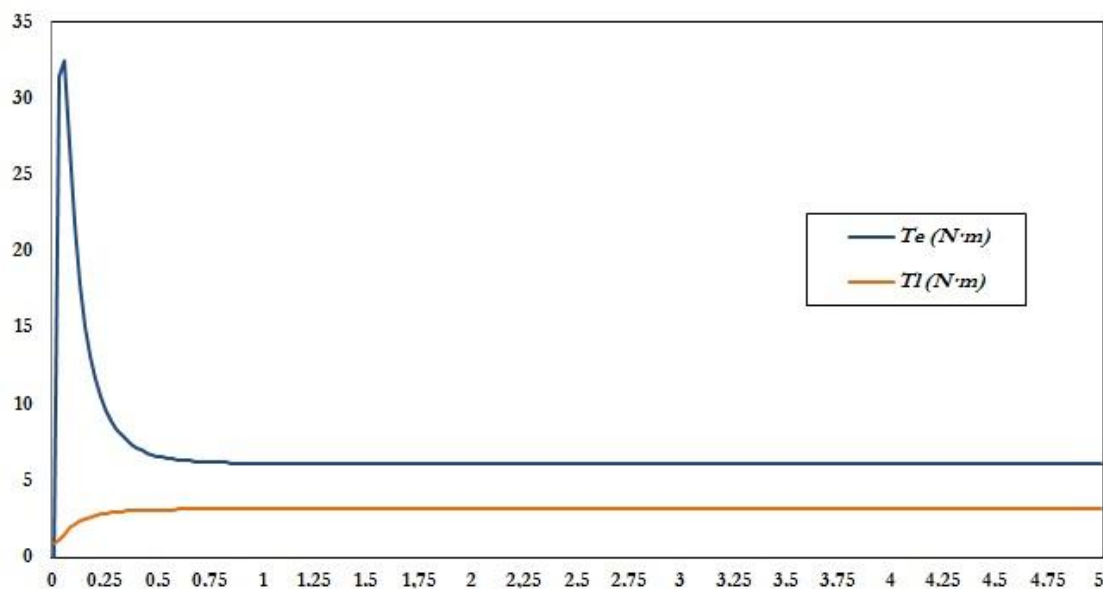


Gráfica 3.1. Intensidad de la armadura y velocidad angular en función del tiempo

Los resultados obtenidos con Matlab (I_a , ω_m) en función de t , se pueden llevar a una hoja Excel con el objeto de obtener los valores del par electromagnético y par de carga (T_e y T_l respectivamente) en función del tiempo de simulación ' t '.

Para calcular ' T_e ' y ' T_l ' se emplean las ecuaciones (3.14) y (3.15) definidas anteriormente. Es de notar que mientras que el par electromagnético es proporcional a la intensidad de la armadura, el par de la carga es función no lineal de la velocidad angular.

Sustituyendo los valores de I_a y ω_m para cada valor de t en las ecuaciones (3.14) y (3.15), se obtiene los valores de T_e y T_l para cada instante de tiempo (Gráfica 3.2).



Gráfica 3.2. Par electromagnético y par de carga en función del tiempo

Las gráficas obtenidas de la programación del sistema de ecuaciones diferenciales (Gráficas 3.1 y 3.2), nos permiten tener una primera idea del aspecto de las curvas de velocidad, intensidad y par que se obtendrán en las posteriores simulaciones llevadas a cabo con Simulink a lo largo de este proyecto.

3.3 Panel fotovoltaico.

3.3.1 Introducción al panel fotovoltaico.

Todo panel solar está formado por un conjunto de células solares asociadas entre ellas en serie y paralelo. Una célula fotovoltaica es un dispositivo capaz de convertir la luz solar en electricidad. La conversión se realiza mediante el fenómeno físico conocido como efecto fotovoltaico que consiste en generar una fuerza electromotriz cuando la superficie de la célula es expuesta a la irradiación solar. La tensión generada puede variar entre $0,3\text{ V}$ y $0,7\text{ V}$ en función de diferentes parámetros como el material utilizado en la fabricación, la temperatura admisible por la celda y el envejecimiento de esta.

En la mayoría de los casos, actualmente se utilizan células formadas por una unión P-N construidas en base de silicio monocristalino. Una celda fotovoltaica se fabrica con dos capas de silicio, una con dopado P (dopada de boro) y la otra con dopado N (dopada de fosforo), creando así la unión P-N.

Cuando los fotones son absorbidos por el semiconductor, transmiten su contenido energético a los átomos de la unión P-N de tal modo que los electrones de estos átomos se liberan y crean electrones (carga N) y huecos (carga P). Este fenómeno produce una diferencia de potencial entre ambas capas.

En la Tabla 3.5 se describen los tipos de células fotovoltaicas según el silicio que lo compone. Estas células son la de silicio policristalino, amorfo y monocristalino. La diferencia entre ellas radica en la forma como los átomos de silicio están dispuestos, es decir, en la estructura cristalina. Existe, además, una diferencia en la eficiencia. Por eficiencia se entiende el porcentaje de luz solar que es transformado en electricidad. Las celdas solares de silicio monocristalino y policristalino tienen casi el mismo y más alto nivel de eficiencia con respecto a las de silicio amorfo.

Una celda solar típica está compuesta de capas. Primero hay una capa de contacto posterior y, luego, dos capas de silicio. En la parte superior se encuentran los contactos de metal frontales con una capa de antirreflexión, que da a la celda solar su típico color azul.

Durante la última década, se ha estado desarrollando nuevos tipos de celdas solares de materiales diversos, entre las que encontramos, por ejemplo, a las celdas de película delgada y a las celdas de CIS (diseleniuro de indio de cobre) y CdTe (telururo de cadmio).

TIPOS DE CÉLULAS	CARACTERÍSTICAS
Células de silicio policristalino	<p>Son aquellas obtenidas a partir de procesos que no necesitan un control exhaustivo de la temperatura en la solidificación del material de silicio, ni tampoco un crecimiento controlado en su red cristalina.</p> <p>El rendimiento obtenido se encuentra en un 12%, pudiendo llegar al 14% con células refinadas.</p> <p>Una gran ventaja en la fabricación de células de silicio policristalino es la posibilidad de producirlas directamente en forma cuadrada, lo que facilita la fabricación de paneles solares compactos sin posteriores mecanizaciones de célula.</p>
Células de silicio amorfo:	<p>La gran ventaja de la utilización del silicio amorfo para la fabricación de células fotovoltaicas es el espesor del material (50 veces más fino que el equivalente de silicio monocristalino)</p> <p>Alto coeficiente de absorción (utilización de espesores de material activo muy pequeños)</p> <p>Uno de los inconvenientes es la degradación que sufren al ser expuestas al sol después de un determinado tiempo de trabajo.</p> <p>Estas células tienen el menor rendimiento del mercado (eficiencia 8%)</p> <p>El coste de fabricación de las células es mucho menor que el resto de tecnologías (por el poco material que se emplea)</p>

Células de silicio amorfo:	<p>Son las más utilizadas en la actualidad, pues industria del silicio es la base de fabricación de todos los semiconductores.</p> <p>La eficiencia de este tipo de células oscila entre el 14% y el 18%, y son las de mayor rendimiento del mercado actual.</p> <p>El proceso al cual ha de someterse el silicio para reunir las características apropiadas para realizar la conversión fotovoltaica conlleva un aumento del coste final de la célula fotovoltaica.</p>
-----------------------------------	--

Tabla 3.5. Clasificación de las células según el tipo de silicio.



Figura 3.16. Tipos de células fotovoltaicas según el silicio.

3.3.2 Curva de máxima potencia (MPP) y factor de relleno (FF).

Para un valor determinado de la corriente fotovoltaica o corriente cedida por la célula y de tensión eléctrica V obtenemos el punto en el cual la potencia entregada a la carga será máxima conocido como punto de máxima potencia

Siempre interesa obtener el mayor rendimiento energético posible por lo que será importante trabajar en este punto de máxima potencia.

Para obtener las coordenadas $V - I$ de dicho punto de máxima potencia, calcularemos $\frac{dP}{dV}$, procedimiento habitual para calcular máximos y mínimos de funciones. De esta manera, obtenemos la tensión a máxima potencia V_{mp} . Sustituyendo este valor en la ecuación que define I-V, se obtiene la intensidad a máxima potencia I_{mp} .

En la Figura 3.17, se representa el punto de máxima potencia junto a los valores de tensión e intensidad relativos a máxima potencia.

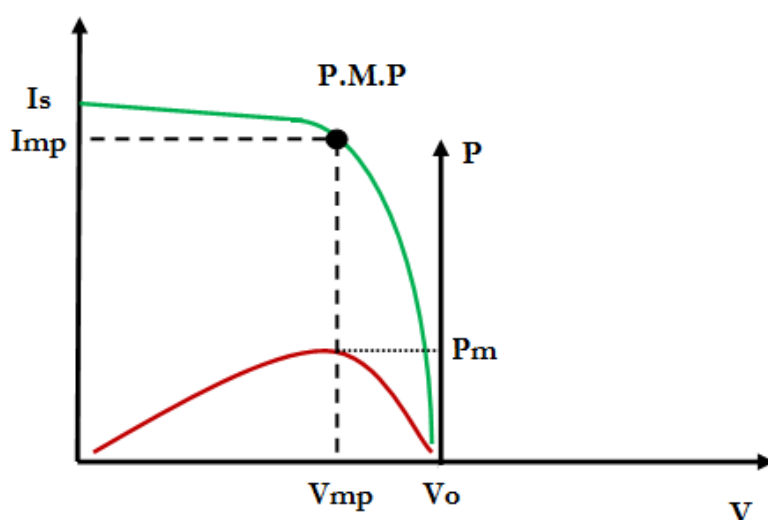


Figura 3.17. Curva de máxima potencia. Tensión e intensidad a máxima potencia.

Donde los parámetros que aparecen en la Figura 3.17 corresponden a:

- Tensión de cortocircuito, $V_o = V_{oc}$
- Tensión a máxima potencia, V_{mp}
- Intensidad de cortocircuito, $I_{sc} = I_s$
- Intensidad a máxima potencia, I_{mp}
- Potencia máxima, P_m

Para describir mejor el punto de máxima potencia se define el factor de relleno o Fill Factor (FF). Este factor se define como el cociente entre la potencia máxima que la célula solar puede dar a la carga y la potencia teórica máxima definida por el punto (V_{oc}, I_{sc}).

$$FF = \frac{P_m}{V_{oc} \cdot I_{sc}} \quad (3.18)$$

El valor máximo que puede adoptar el FF es 1, cuanto más próximo a 1 sea, la característica I-V con iluminación se aproxima más al rectángulo de máxima potencia teórica y la célula es de mayor calidad.

3.3.3 Rendimiento de la célula fotovoltaica

Como en cualquier sistema generador de energía hay que calcular el rendimiento de la célula cuya expresión es la que sigue.

$$\eta = \frac{P_m}{P_l} \quad (3.19)$$

Donde P_l es la potencia luminosa recibida por la célula, el producto de $S \cdot A$, es decir, la irradiación solar (W/m^2) multiplicada por la superficie de la célula (m^2).

La eficiencia crece linealmente con el nivel de radiación y el tamaño de la celda, sin embargo, decrece linealmente con la temperatura de la célula.

El rendimiento de la célula también puede definirse según la ecuación siguiente.

$$\eta = \frac{P_{pv}}{MMP} = \frac{V_{pv} \cdot I_{pv}}{MMP} \quad (3.20)$$

Donde:

- Potencia generada por el panel fotovoltaico, P_{pv}
- Tensión generada por el panel fotovoltaico, V_{pv}
- Intensidad generada por el panel fotovoltaico, I_{pv}
- Punto de máxima potencia, MMP

El rendimiento de la célula viene limitado por distintos factores intrínsecos y de diseño. Estos factores son los siguientes:

- **Energía de los fotones incidentes.**

Para generar los pares electrón-hueco es necesario que los fotones que llegan a la célula tengan una determinada energía. En la radiación solar, una parte de los fotones incidentes no tiene esa energía por lo que se pierden, y otros tienen una energía mayor, por lo que se pierde el exceso.

- **Pérdidas por recombinación.**

El proceso de recombinación depende de los defectos de la estructura cristalina del semiconductor, cuanto más puro sea (silicio monocristalino), estas pérdidas serán menores.

- **Resistencia serie.**

La resistencia serie es una característica muy importante ya que disminuye el factor de forma y, por lo tanto, la eficiencia de la célula. Esa resistencia se debe a que los electrones generados en el semiconductor que alcanzan la zona 'n' superficial, han de correr por la superficie hasta alcanzar una tira metálica de la rejilla. La resistencia serie es menor cuanto más profunda sea la zona 'n' y cuanto mayor sea la superficie metálica de la rejilla, pero entonces la superficie del semiconductor sobre la que incide la luz solar es menor (mayor sombra) y el valor de la tensión a circuito abierto es también más pequeño, por lo que hay que buscar un compromiso a la hora del diseño de la célula. Esta resistencia además disipa energía por efecto Joule, al circular la corriente por ella, en forma de calor y que debe disipar la célula.

- **Pérdidas por reflexión parcial.**

Parte de la luz que incide sobre la célula es reflejada por la superficie de esta, por lo que se pierde. Para evitar esta pérdida, en la fabricación de las células se emplean capas antirreflectantes y superficies rugosas.

La suma de todas estas pérdidas disminuye el rendimiento de la célula, lo que explica las diferencias que existen entre los rendimientos obtenidos en laboratorio y los de las células comerciales que resultan de los procesos industriales de fabricación.

3.3.4 Primer modelo de la célula fotovoltaica desarrollado en este proyecto.

El primer modelo de panel fotovoltaico llevado a cabo en este proyecto, está basado en la ecuación (3.21), que define el circuito equivalente simplificado de células fotovoltaicas que aparece en la Figura 3.18.

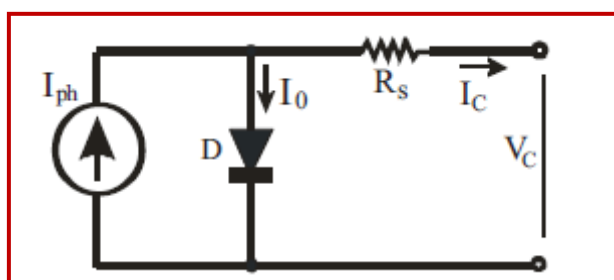


Figura 3.18. Circuito equivalente simplificado de células fotovoltaicas

La **tensión de salida de la célula fotovoltaica** es función de la fotocorriente determinada principalmente por la corriente de carga en función del nivel de irradiación solar durante la operación.

$$V_c = \frac{A \cdot K \cdot T_c}{e} \cdot \ln \left(\frac{I_{ph} + I_0 - I_c}{I_0} \right) - R_s \cdot I_c \quad (3.21)$$

Donde los diferentes parámetros que aparecen en la ecuación (3.21), corresponden a:

- e : carga del electrón, C.
- K : constante de Boltzmann, J/K.
- A : factor de ajuste
- I_c : Corriente de salida de la célula, A.
- I_{ph} : fotocorriente, en función de la intensidad de irradiación y la temperatura de la unión, A.
- I_0 : corriente de saturación inversa del diodo, A.
- R_s : resistencia en serie de la célula, Ω .
- T_c : temperatura de funcionamiento de referencia de la célula, $^{\circ}\text{C}$.
- V_c : tensión de salida de la célula, V.

El factor de ajuste de la curva A se utiliza para ajustar las características I-V de la célula obtenida de la ecuación (3.21) a las características reales obtenidas por la prueba.

La ecuación. (3.21) da la tensión de una célula solar, que multiplicada por el número de células conectadas en serie, se obtiene la tensión del campo total.

La matriz de intensidad será la suma de las corrientes que fluyen a través de las células de ramas en paralelo, por tanto, la corriente de la célula I_c se obtiene dividiendo la matriz intensidad por el número de los elementos conectados en paralelo antes de ser utilizado en (3.21), para un caso concreto de temperatura de la célula T_c con su correspondiente nivel de radiación solar S_c .

Si la temperatura y el nivel de irradiación solar cambian, las salidas de tensión y corriente de los paneles fotovoltaicos también cambiarán. Estos cambios se deben a que las variaciones de la temperatura ambiente y los niveles de radiación solar influyen en los cambios en la temperatura de funcionamiento de la célula, resultando un nuevo valor de tensión de salida y un nuevo valor de fotocorriente.

Estos efectos son representados en el modelo por los coeficientes de temperatura C_{TV} y C_{TI} correspondientes a la tensión y fotointensidad de salida de la célula respectivamente (ecuaciones 3.22 y 3.23)

$$C_{TV} = 1 + \beta_T \cdot (T_c - T_x) \quad (3.22)$$

$$C_{TI} = 1 + \frac{\gamma_T}{S_c} \cdot (T_x - T_c) \quad (3.23)$$

Incluso si la temperatura ambiente no cambia significativamente durante el día, el nivel de radiación solar varía en función de la cantidad de luz solar y las nubes.

Por tanto, un cambio en el nivel de radiación solar provoca un cambio en la fotocorriente de la célula y la temperatura de funcionamiento, que a su vez afecta a la tensión de salida de la célula.

Así, el cambio de los valores de temperatura de funcionamiento y fotocorriente debido a la variación en el nivel de radiación solar, se puede expresar a través de dos constantes, C_{SV} y C_{SI} , es decir, factores de corrección para los cambios en la tensión de salida de la célula V_c y la fotocorriente I_{ph} , respectivamente (Ecuaciones 3.24 y 3.25).

$$C_{SV} = 1 + \beta_T \cdot \alpha_S \cdot (S_x - S_c) \quad (3.24)$$

$$C_{SI} = 1 + \frac{1}{S_C} \cdot (S_X - S_C) \quad (3.25)$$

Donde

- S_C : es el nivel de referencia de la irradiación solar durante las pruebas de las células
- S_X : es el nuevo nivel de irradiación solar.
- ΔT_C : es cambio de temperatura que se produce debido al cambio en el nivel de irradiación solar, el cual se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$\Delta T_C = \alpha_S \cdot (S_X - S_C) \quad (3.26)$$

- α_S : constante que representa la pendiente de los cambios en la temperatura de funcionamiento de la célula debido a la variación en el nivel de irradiación solar.

Una vez calculados los factores de corrección C_{TV} , C_{TI} , C_{SV} , C_{SI} , se obtienen los valores finales de tensión de salida de la célula y fotocorriente para los valores de temperatura T_x e irradiación solar S_x dados según las condiciones ambientales supuestas en el momento de la simulación (ecuaciones 3.27 y 3.28).

$$V_{CX} = C_{TV} \cdot C_{SV} \cdot V_C \quad (3.27)$$

$$I_{phx} = C_{TI} \cdot C_{SI} \cdot I_{ph} \quad (3.28)$$

Donde V_C y I_{ph} son los valores de referencia de la tensión de salida y fotocorriente de la célula, respectivamente.

3.3.5 Segundo modelo de la célula fotovoltaica desarrollado en este proyecto.

La estructura básica del modelo de una celda o célula solar es semejante a la de un fotodiodo, en general de silicio, diseñada para maximizar la absorción de fotones procedentes de la luz y minimizar la reflexión.

Cuando esta recibe una luz incidente se comporta como un generador de corriente inversa cuyo valor aumenta con la cantidad de luz que incide sobre él.

La **generación de corriente** se expresa como la diferencia entre la corriente fotogenerada I_l debida a la generación de portadores en la iluminación incidente y la corriente del diodo I_D correspondiente a la corriente en oscuridad por la recombinación de portadores que produce el voltaje externo (ecuación 3.29).

$$I = I_l - I_D \quad (3.29)$$

La ecuación que describe correctamente la característica I-V de la mayoría de las células solares fotovoltaicas es la que sigue:

$$I = I_l - I_0 \cdot e^{(e \cdot V / n \cdot K \cdot T)} \quad (3.30)$$

Donde:

- I_l : Corriente fotogenerada (generada por el efecto fotovoltaico), A .
- I_D : Corriente en la oscuridad por recombinación de portadores que produce el voltaje externo, A .
- e : Carga del electrón, C .
- V : Tensión eléctrica en los bornes del diodo, V .
- K : Constante de Boltzmann, J/K .
- n : Factor de idealidad del diodo.
- T : Temperatura absoluta, K .

La ecuación (3.30), es el punto de partida de este segundo modelo desarrollado en este proyecto que define el comportamiento del panel fotovoltaico. Es de notar, que mientras el primer modelo desarrollado en este proyecto, parte de la ecuación que define la tensión de salida de la célula, en este segundo modelo se parte de la ecuación que define la corriente generada por la célula.

Ambas ecuaciones (la (3.21) empleado en el primer modelo y la (3.30) utilizada en el segundo), definen la característica I-V de toda célula fotovoltaica.

La resistencia serie R_s es una resistencia interna de la célula y se debe a la malla de metalización, a la resistencia de los contactos y a la resistencia del propio semiconductor. La resistencia paralelo R_p o R_{sh} tiene su origen en imperfecciones en la unión PN que constituye la célula y es la responsable de permitir la existencia de fugas de corriente.

En la celda fotovoltaica ideal se consideraban $R_s = 0$ y $R_{sh} = \infty$. Sin embargo, en las células solares de silicio toman los valores $R_s = 0.05 - 0.1\Omega$ y $R_{sh} = 200 - 300\Omega$ ($I_{sh} \approx 0$). Estos dos factores se pueden tener en cuenta en el modelo de la célula solar de forma que su ecuación característica viene ahora determinada por la ecuación (3.31).

$$I = I_l - I_0 \cdot \left(e^{(e \cdot V / (n \cdot K \cdot T))} - 1 \right) - \frac{V + I \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (3.31)$$

El nuevo circuito de esta ecuación ahora es el que aparece en la Figura 3.19.

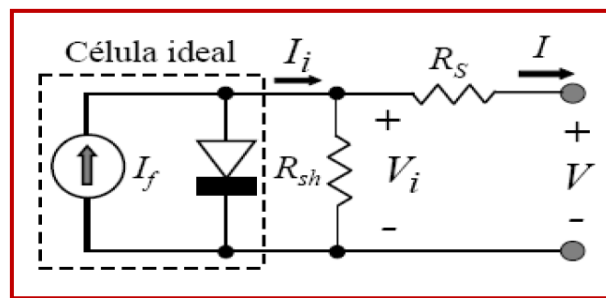


Figura 3.19. Circuito modificado que define la ecuación (3.31).

Teniendo en cuenta las expresiones que aparecen a continuación, la ecuación (3.31) queda modificada según la forma que se presenta en la ecuación (3.32).

- $I_l = I_{sc}$, corriente de cortocircuito de la célula fotovoltaica. Este valor se especifica en las hojas del fabricante del panel seleccionado.
- $I = I_{pv} \rightarrow$ solución de la ecuación (3.32)
- $V = V_{pv} \rightarrow V_{pv} = N_s \cdot V_{pv,cell}$,
- $V_t = \frac{n \cdot K \cdot T}{e}$, tensión umbral en V.
- $V_D = V + R_s \cdot I$, tensión del diodo en V.

$$I = I_{sc} - I_0 \cdot \left(e^{\frac{V_D}{V_t}} - 1 \right) - \frac{V_D}{R_p} \quad (3.32)$$

La ecuación (3.32), es la ecuación principal que define el segundo modelo de panel fotovoltaico desarrollado en este proyecto.

CAPÍTULO 4.
DESCRIPCIÓN DEL
SIMULADOR.

4. DESCRIPCIÓN DEL SIMULADOR.

4.1 Bloque motor de Matlab-Simulink.

El bloque 'Dc Machine' de Matlab-Simulink representa un motor de continua, el cual está basado en las ecuaciones que describen el funcionamiento de este tipo de motor definidas en el capítulo 3. A continuación se explicará el bloque 'Dc machine' de Matlab-Simulink, su programación y el esquema básico realizado con Matlab-Simulink, constituyendo la simulación de partida de este proyecto.

4.1.1 Programación del bloque 'DC machine' en Matlab-Simulink.

Las ecuaciones que definen el comportamiento de un motor de continua de imanes permanentes (PMDC), son empleadas en el modelo establecido de Matlab-Simulink de la biblioteca 'Simpower-System' en la opción 'DC Machine'.

En la Figura 4.1 se representa el bloque 'DC Machine' seleccionado para la simulación del problema de estudio.

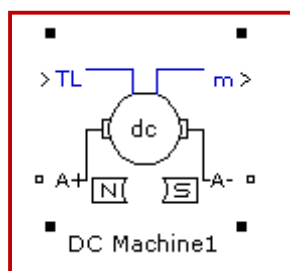


Figura 4.1. Bloque Dc machine (Matlab-Simulink).

Como se observa en la Figura 4.1, la máquina dispone de una señal de entrada (par de la carga TL), y también de una salida denominada por 'm', es decir, esto se refiere a un vector que contiene tres señales de salida. En el caso de estudio, estas señales de salida son la velocidad angular, la intensidad de la armadura y el par eléctrico.

El circuito de la armadura [A+,A-] está formado por una inductancia de devanado de la armadura (L_a) y una resistencia de devanado de la armadura (R_a) en serie con una fuerza contraelectromotriz.

Si se selecciona la opción 'DC Machine', aparece por defecto seleccionada una máquina de corriente continua de excitación independiente. Por tanto, como el sistema de estudio se basa en un motor de continua de imanes permanentes, habrá que seleccionar en 'field type (tipo de campo)' la opción 'permanent magnet (imanes permanentes)' y en 'mechanical input (entrada mecánica)' se ha elegido el par Tl (Figura 4.2).

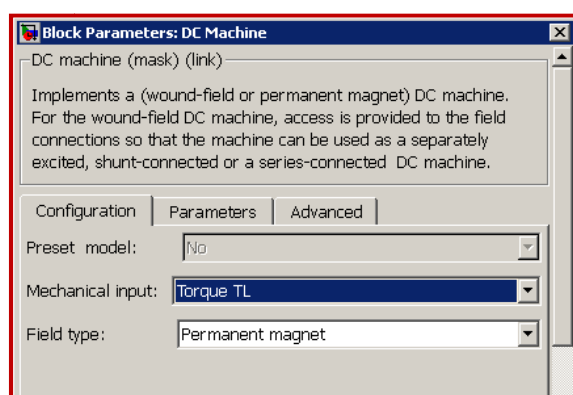


Figura 4.2. Elección del tipo de máquina de corriente continua (imanes permanentes) y de la entrada mecánica (par), en la opción 'DC Machine' de la biblioteca 'Simpower-System' ('Matlab-Simulink').

Una vez seleccionada el tipo de máquina y la entrada mecánica, se introducen los parámetros del modelo definidos en la Tabla 3.1.

Los parámetros a introducir en bloque Dc Machine son los siguientes:

- La resistencia e inductancia de la armadura ($0,15 \Omega$, $0,003 H$).
- La constante de tensión Kt :

$$Kt = 0,2 V \cdot s / rad = 0,2 V \cdot s / rad \cdot 1 min / 60 s \cdot 2\pi / 1 rev = 0,0209439 V / rpm$$

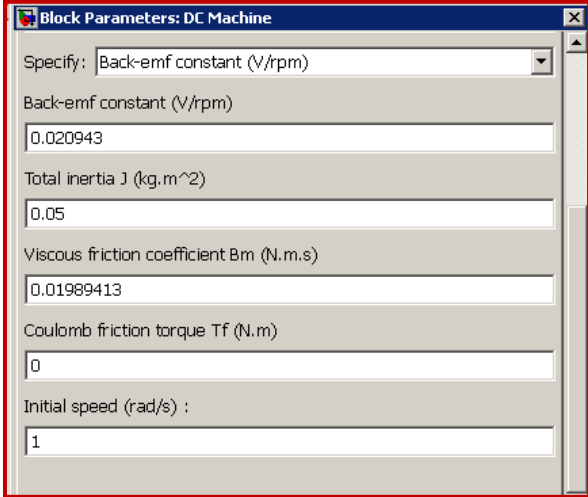
- El momento de inercia del motor J , el cual, se calcula a partir de la ecuación (3.17), y tomando una velocidad de referencia de $156 rad/s$.

$$J = 14,44 \cdot 10^{-3} + 62,6 \cdot 10^{-6} \cdot 156 + 1,06 \cdot 10^{-6} \cdot 156^2 = 0,05 \text{ Kg} \cdot \text{m}^2$$

- La constante de fricción viscosa, la cual se calcula según la ecuación (3.16), y para una velocidad angular de 156 rad/s:

$$B_m = 5,7 \cdot 10^{-3} + 25 \cdot 10^{-6} \cdot 156 + 0,423 \cdot 10^{-6} \cdot 156^2 = 0,01989413 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}$$

En la Figura 4.3 se muestran los valores numéricos a introducir en el bloque Dc machine del modelo.



Parameter	Value
Specify:	Back-emf constant (V/rpm)
Back-emf constant (V/rpm)	0.020943
Total inertia J (kg.m ²)	0.05
Viscous friction coefficient Bm (N.m.s)	0.01989413
Coulomb friction torque Tf (N.m)	0
Initial speed (rad/s) :	1

Figura 4.3. Parámetros a introducir en el modelo DC Machine. Resistencia e inductancia de la armadura, constante de tensión, inercia total, coeficiente de fricción viscosa, par de fricción de Coulomb y velocidad inicial.

El modelo funcional que implementa en bloque 'DC Machine' aparece representado en el diagrama de bloques de la Figura 4.4.

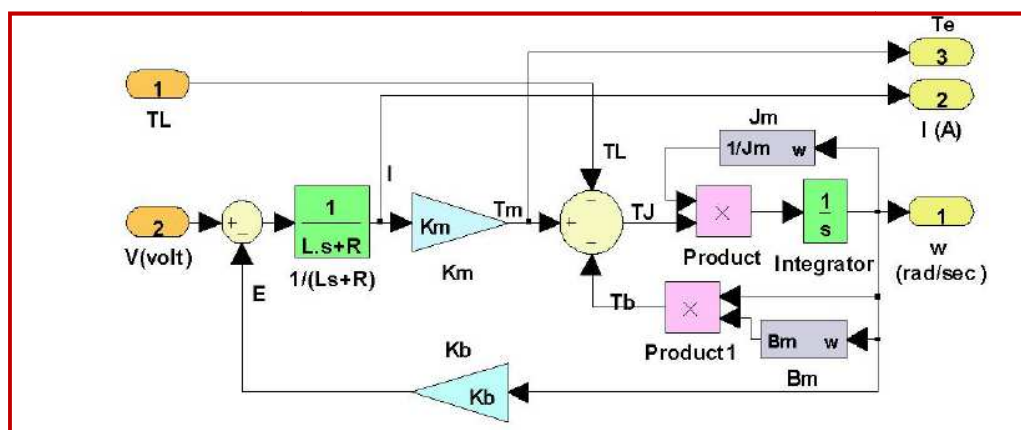


Figura 4.4. Modelo funcional del PMDC motor (Matlab-Simulink).

4.1.2 Esquema de partida del bloque PMDC motor en Matlab simulink.

Para completar el bloque 'Dc Machine', se añadirán una serie de elementos tales como los que aparecen en la Figura 4.5.

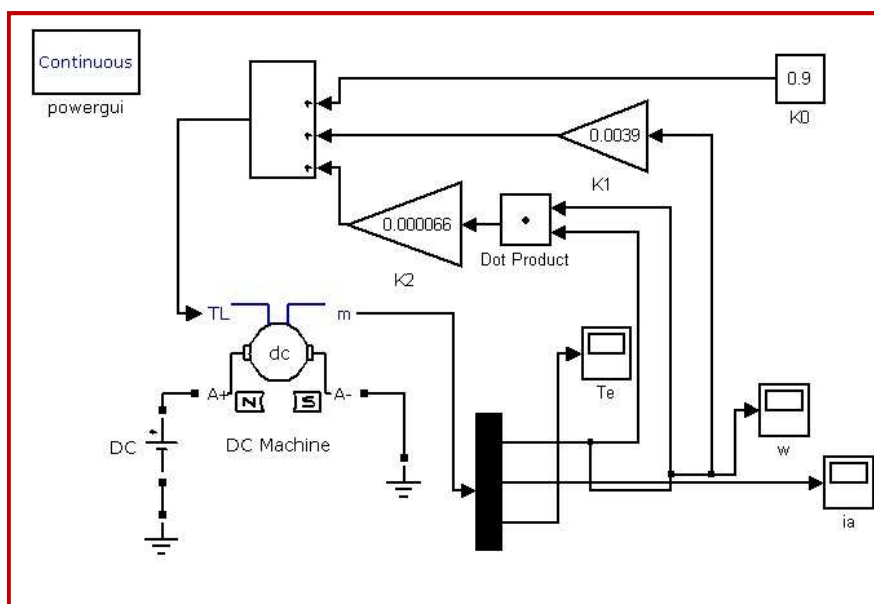


Figura 4.5. Esquema del bloque de la máquina de corriente continua de imanes permanentes. Matlab- Simulink.

A continuación se procede a explicar de forma detallada, cada uno de los elementos que constituyen el esquema correspondiente al bloque motor de la Figura 4.5. Los elementos que aparecen en dicho esquema junto con el bloque DC Machine son:

I. Ganancia (Gain).

Se han utilizado tres ganancias denominadas $K0$, $K1$ y $K2$, correspondientes a las constantes del par de la carga. Dichos valores numéricos han sido ya dados en el enunciado del problema de estudio (Tabla 3.1).

Estos elementos se encuentran denominados en el entorno de Matlab-Simulink con el nombre 'Gain' dentro de la librería 'Math Operations'. El símbolo que los representa se muestra en la Figura 4.6.



Figura 4.6. Bloque 'Gain' (Matlab-simulink).

II. Demultiplexor (Demux).

En la Figura 4.4 se utiliza un elemento denominado por el nombre 'Demux', el cual procede de la librería 'Signals Roating' del entorno de Matlab-simulink.

El bloque 'Demux' extrae las componentes de una señal de entrada y provee los componentes en señales separadas. El bloque acepta tanto señales vectoriales como buses de señales.

El parámetro 'Number of outputs' permite especificar el número y dimensión de cada puerto de salida. Si no se configura la dimensión de las salidas, el bloque lo determina automáticamente.

En este caso, saldrán tres señales diferentes del bloque 'Demux'. Estas salidas corresponden a la velocidad angular, intensidad de la armadura y par eléctrico.

En la opción 'Display option' se puede elegir entre las opciones siguientes:

- BAR (por defecto). En esta opción se muestra el icono como una barra sólida del mismo color.
- NONE (ninguno). En esta opción se muestra el icono como una caja que contiene el nombre del tipo de bloque.

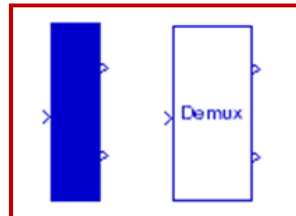


Figura 4.7. Bloque 'Demux'. Display options: Bar/ None (Matlab-simulink).

III. Osciloscopio (Scope).

En el esquema de la Figura 4.5 se han empleado tres elementos 'Scope' para visualizar las tres señales de salida a lo largo del tiempo. Estas señales son la velocidad angular, intensidad de la armadura y par del motor en función del tiempo de simulación.

Este elemento 'Scope' se encuentra dentro de la librería 'Sinks' de Matlab-Simulink.

En la Figura 4.8 se puede visualizar el bloque de dicho elemento.

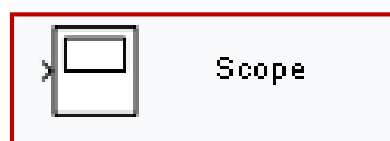


Figura 4.8. Bloque 'Scope' (Matlab-simulink).

IV. Dot product (doble producto) y Sum (suma).

Como se observa en el esquema de la Figura 4.5, dos de las tres ganancias son multiplicadas por la velocidad angular de salida, una de ellas una vez ($K2$) y la otra dos veces ($K3$).

El elemento empleado para realizar el cuadrado de la velocidad angular de salida, se denota por ‘Dot Product’ de la librería ‘Math Operations’ de Matlab-simulink.

Finalmente la suma de la ganancia $K0$ con la ganancia $K1$ multiplicada una vez por la velocidad angular, más la suma de la ganancia $K2$ por el cuadrado de la velocidad, da lugar a la señal de entrada Tl que se le suministra al bloque DC machine.

El elemento empleado para realizar dicha suma se denomina ‘Sum’, y también se encuentra en la librería ‘Math operations’.

V. DC Voltage Source.

El bloque ‘DC Voltage Source’ representa una fuente de tensión constante y se encuentra dentro de la librería ‘Electrical Source (fuente eléctrica)’ del apartado ‘SimPowerSystem’ de Simulink.

El esquema de dicho bloque aparece representado en la Figura 4.9. La amplitud seleccionada para este caso es de 36 V.

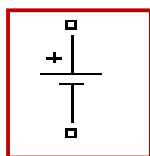


Figura 4.9. Esquema del bloque ‘DC Voltage Source’ (Matlab-Simulink).

4.2 Bloque de control de Matlab-Simulink aplicado al motor.

El esquema de control aplicado al bloque motor definido en el anterior apartado, está basado en los documentos de la principal bibliografía consultada (*An Efficient Tri-Loop Controller for Photovoltaic Powered Four-Wheel Electric Vehicle* y *A Hybrid Photovoltaic PV Array-Battery Powered EV-PMDC Drive Scheme*).

Las simulaciones llevadas a cabo con este bloque de control aparecen el capítulo siguiente. El esquema de control es el de la Figura 4.10.

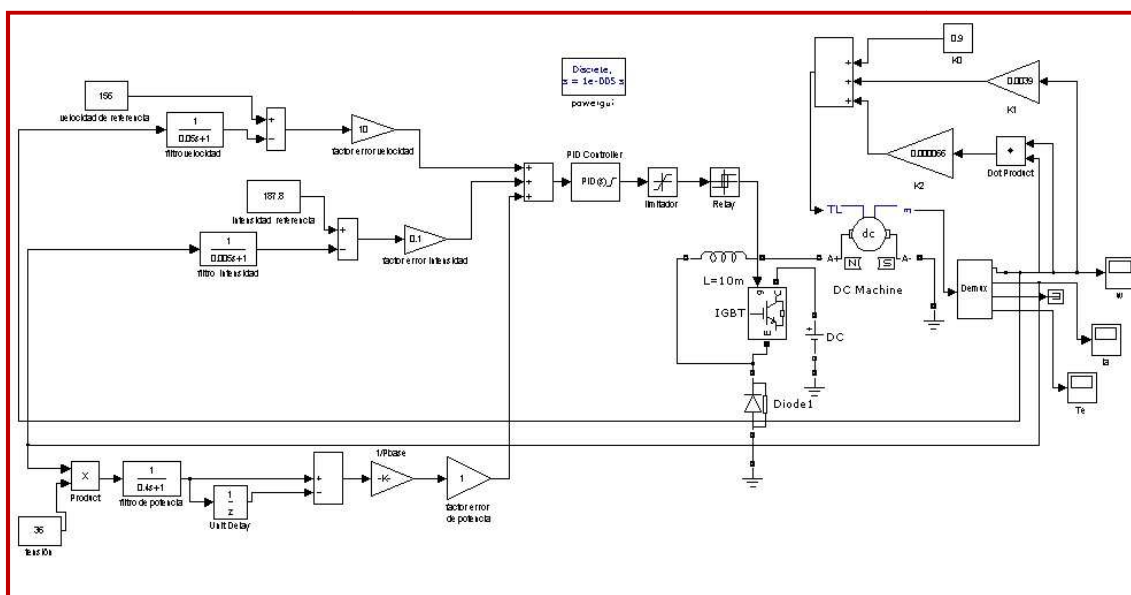


Figura 4.10. Esquema de control final en Matlab-Simulink

En la Figura 4.11 se ve ampliada la parte del esquema de la Figura 4.10 dedicada al control.

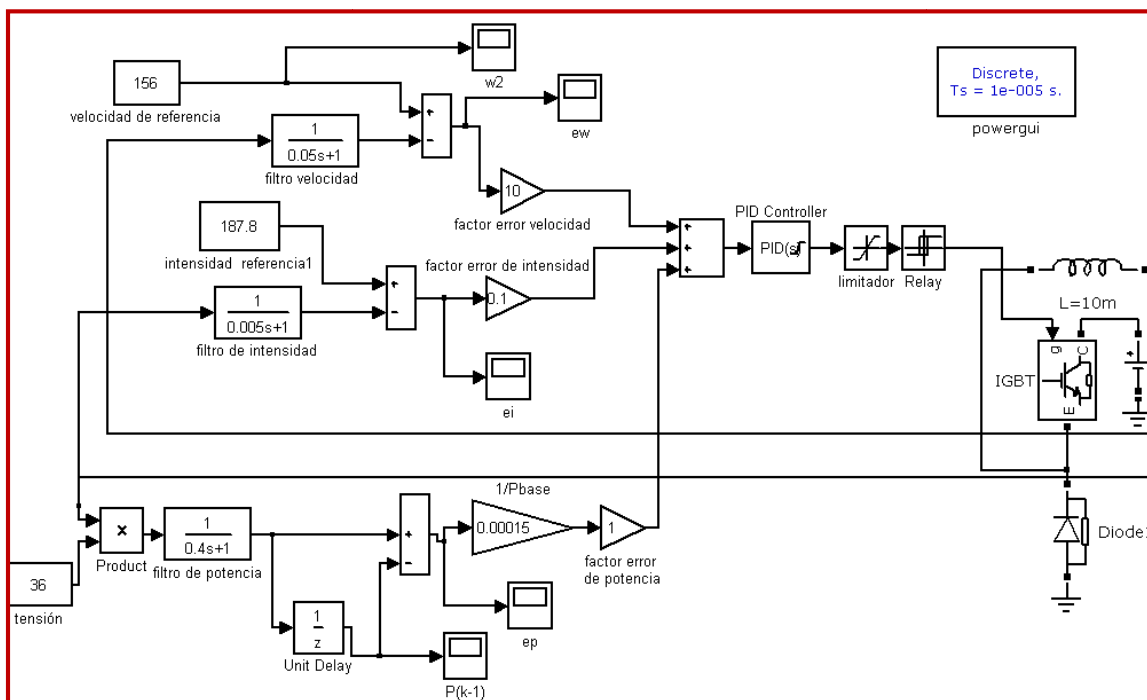


Figura 4.11. Parte del esquema de la Figura 4.9 dedicada al control

Como se puede observar, se controlan tres variables (velocidad, intensidad y potencia). Para ello se calculan los errores de velocidad, intensidad y potencia, que multiplicados por los factores de ponderación de error correspondientes a cada variable y sumados, darán como resultado la señal error total aplicada al sistema de control (Controlador PID).

En la Figura 4.12 se representa el esquema de control de cualquier sistema. Como se puede observar, la señal error se obtiene mediante la diferencia entre la señal de referencia del sistema menos el valor medido. Luego la señal error es aplicada al sistema de control (Controlador PID). Esta estructura es la que se sigue en el esquema de control del caso de estudio, pero con la salvedad de que estamos controlando tres variables a la vez. El error total calculado según la expresión (2.1) es el aplicado al sistema de control.

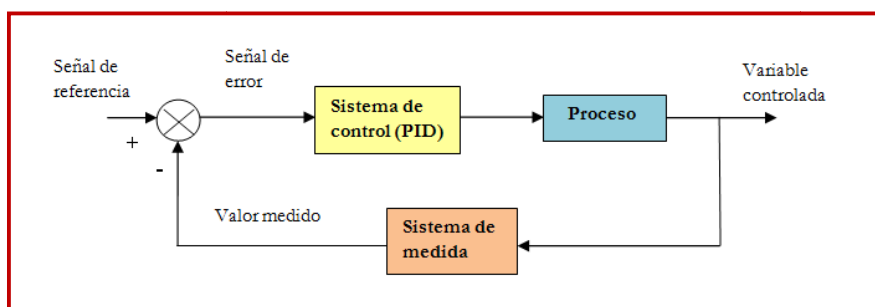


Figura 4.12. Esquema general de control de un sistema.

Como se ha mencionado ya en capítulos anteriores, se toman los datos de los artículos de referencia por la similitud con el caso de estudio. En este caso, los valores numéricos de los factores de ponderación del error de velocidad, intensidad y potencia junto a los periodos de cada uno de los filtros utilizados para filtrar cada una de las señales de velocidad, intensidad y potencia del motor medidas, se dan en la tabla siguiente.

γ_w	γ_I	γ_p	T_w (s)	T_i (s)	T_p (s)
10	0,1	1	0,05	0,005	0,4

Tabla 4.1. Datos para el esquema de control.

A diferencia de los bucles de cálculo de los errores de velocidad e intensidad, se ha procedido de manera diferente en el cálculo del error de potencia. Este error es calculado a partir de la expresión siguiente:

$$ep = [P(k) - P(k - 1)]/P_{base} \quad (4.1)$$

La expresión (4.1) es implementada en el diagrama de bloques de la Figura 4.1.

Siendo:

- $P_{base} = 36 \cdot 187,8 = 6760,8 \text{ W}$
- $P(k)$ es el producto de la señal intensidad por 36 V
- $P(k - 1) = z^{-1} \cdot P(k)$, por la definición de transformada Z.

El sistema de control utilizado se trata de un controlador PID definido por la siguiente función de transferencia:

$$G(s) = K_p \cdot \left(1 + \frac{1}{T_i \cdot s} + T_d \cdot s\right) \quad (4.2)$$

Donde K_p , T_i y T_d son las constantes proporcional, integral y derivativa del controlador PID.

Los valores de dichas constantes corresponden a los valores dados en los artículos de referencia (Tabla 3.1). Dichas constantes están dadas en la Tabla 4.2.

K_p	T_i	T_d
150	5	2

Tabla 4.2. Constantes del controlador PID.

El esquema de la Figura 4.11 está constituido por una serie de elementos específicos de Matlab-Simulink además de por los bucles de cálculo de los errores y controlador PID. Estos elementos son:

- Saturation
- Relay
- IGBT
- Diode

En los apartados siguientes se describen los anteriores elementos utilizados en el esquema de la Figura 4.11, así como los bloques que los definen en Matlab-Simulink.

4.2.1 Saturation (limitador).

El bloque ‘Saturation’ de la librería ‘Discontinuities’, impone límites superior e inferior en una señal de entrada.

Cuando los parámetros ‘Limit Lower’ y ‘Limit Upper’ tienen el mismo valor, la salida del bloque es ese valor.

La figura siguiente muestra el bloque del elemento ‘Saturation’ de Matlab-simulink.



Figura 4.13. Bloque ‘Saturation’ de la librería ‘Discontinuities’ (Matlab-Simulink).

El panel principal de la caja de diálogo del bloque ‘Saturation’ aparece en la Figura 4.14.

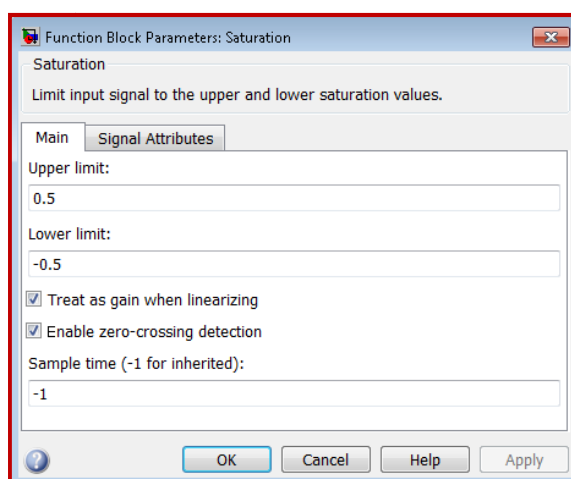


Figura 4. 14. Caja de diálogo del bloque ‘Saturation’ (Matlab-Simulink).

En la caja de diálogo de dicho bloque aparecen los siguientes parámetros:

- **Upper limit** (límite superior)

En esta opción se especifica el límite superior de la señal de entrada. Por defecto aparece seleccionado el valor 0,5.

Cuando la señal de entrada al bloque de saturación está por encima de este valor, la salida del bloque se recorta a este valor.

- **Lower limit** (límite inferior)

En esta opción se especifica el límite inferior de la señal de entrada. Por defecto aparece seleccionado el valor $-0,5$.

Cuando la señal de entrada al bloque de saturación es inferior a este valor, la salida del bloque se recorta a este valor.

4.2.2 Relay

El bloque ‘Relay’ de la librería de Simulink denominada ‘Discontinuities’, permite su salida para cambiar entre los dos valores especificados. Cuando el relé está activado, permanece encendida hasta que la entrada cae por debajo del valor del parámetro ‘Switch off point’. Cuando el relé está

apagado, permanece apagado hasta que la entrada supera el valor del parámetro ‘Switch on point’. El bloque acepta una entrada y genera una salida.

El valor de ‘Switch on point’ debe ser mayor o igual que valor de ‘Switch off point’.

En la figura siguiente aparece representado el bloque ‘Relay’ de Matlab-Simulink.

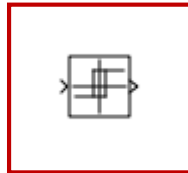


Figura 4.15. Bloque ‘Relay’ de la librería ‘Discontinuities’ (Matlab-Simulink).

El panel principal de la caja de diálogo del bloque ‘Relay’ aparece en la Figura 4 .

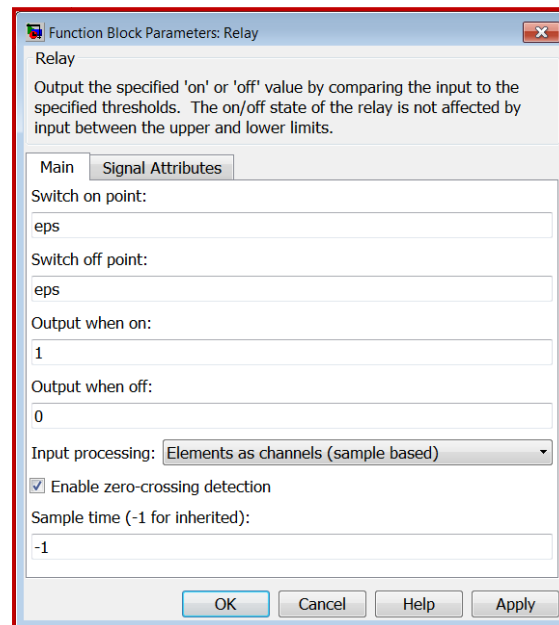


Figura 4.16. Caja de diálogo del bloque ‘Relay’ (Matlab-Simulink).

4.2.3 IGBT (Transistor de compuerta aislada)

Los transistores de compuerta aislada o IGBT, combinan las características de alta impedancia en la compuerta de los transistores MOSFET, con la capacidad de manejo de alta corriente de los transistores BJT o bipolares. Esto se logra combinando una compuerta aislada como las de los transistores MOSFET, que funciona como la base de un transistor bipolar, para realizar las funciones de un interruptor de potencia en un solo dispositivo.

Algunas de las ventajas en este tipo de transistores, es el hecho de utilizar un sistema de control bastante simple y las bajas pérdidas por conmutación y conducción.

Las fugas de corriente presentadas por los transistores de compuerta aislada son muy pequeñas debido a la compuerta aislada que se usa para su control, lo cual supone un manejo mas eficiente de la potencia.

Este dispositivo tiene tres terminales el colector, emisor y compuerta. Las primeras dos actúan como el colector y emisor de un transmisor bipolar, permitiendo el paso de la corriente controlada a través de éstas. Por otra parte, la compuerta funciona como la compuerta de un transmisor MOSFET, controlado la corriente que circula a través del colector y emisor por medio de la diferencia de potencial aplicada entre la compuerta y el emisor.

El bloque IGBT se encuentra dentro de la librería 'Power electronics' de Simulink, y se define como una combinación en serie de una resistencia ' R_{on} ', una inductancia ' L_{on} ', y una fuente tensión de corriente continua ' V_f ' en serie con un interruptor controlado por señal lógica $g > 0$ o $g = 0$.

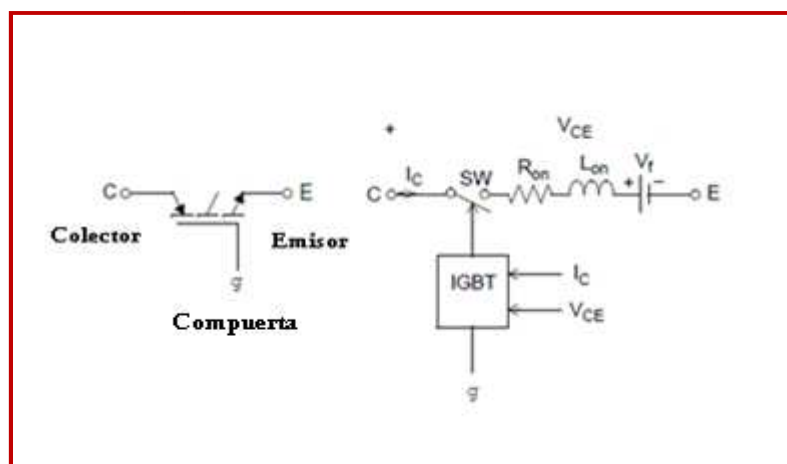


Figura 4.17. Bloque 'Igbt' de Matlab-simulink.

La principal aplicación de estos transistores es su uso como interruptores controlados por medio de compuerta. Por esta razón, al estudiar este tipo de transistores, se hace con un enfoque en dos formas de operación. El transistor puede funcionar en corte (apagado) o saturación (encendido) entre el colector y emisor, dependiendo de la señal aplicada en la compuerta 'g'.

4.2.3.1 Transistor IGBT en saturación

En estado de saturación la corriente puede fluir libremente a través del mismo, desde el colector al emisor siguiendo la dirección que indica la flecha de su símbolo. A pesar de ser un dispositivo eficiente, presenta una caída de tensión entre colector y emisor, produciendo un consumo de energía.

Para que un transistor IGBT alcance el punto de saturación se requieren dos condiciones. Estas condiciones son:

- El voltaje entre el colector y emisor debe ser mayor a la caída de tensión propia de cada transistor.
- En la compuerta debe aplicarse un nivel de tensión mayor al nivel existente en el emisor, esta diferencia de potencial debe ser proporcional a la corriente deseada entre el colector y emisor del transistor.

Dicho con otras palabras, el bloque IGBT se enciende cuando la tensión de colector-emisor es positiva y mayor que V_f , aplicándose una señal positiva ($g > 0$) en la compuerta 'g'.

4.2.3.2 Transistor IGBT en corte

Después de llevar al transistor IGBT al punto de saturación y de fluir la corriente entre el colector y emisor para alimentar la carga, muchas veces es necesario interrumpir esta corriente con el objetivo de controlar la cantidad total de corriente aplicada a la carga o permitir la liberación de la energía almacenada en la carga.

Cuando la compuerta se coloca a un nivel de potencia menor que el aplicado al emisor, la diferencia de potencial entre el colector y emisor comienza a aumentar linealmente, pero por un breve instante la corriente mantiene el mismo valor que circulaba durante la etapa de saturación, para luego disminuir hasta alcanzar un valor igual a cero.

Por tanto, el dispositivo IGBT estará en estado apagado cuando la tensión del colector-emisor es negativa o positiva pero menor que V_f , aplicándose en la compuerta una señal de valor igual a cero ($g = 0$).

La característica de apagado del modelo IGBT se aproxima por dos segmentos según la Figura 4.18. Cuando la señal del puerto g cae a cero, la corriente de colector disminuye ($I_{max} \rightarrow 0,1 I_{max}$) durante el tiempo de caída ' T_f ', y luego vuelve a caer durante el tiempo en cola ' T_t ' ($0,1 I_{max} \rightarrow 0$).

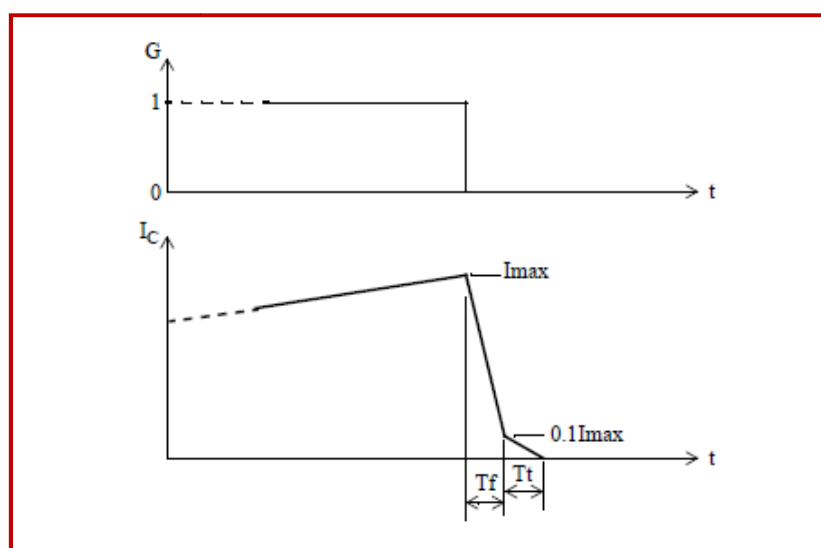


Figura 4.18. Apagado del bloque IGBT de Matlab-Simulink. Variación de la intensidad del colector cuando el puerto de entrada $g=0$.

4.2.4 Diodo (diodo).

Uno de los dispositivos más importantes de los circuitos de potencia son los diodos, aunque tienen algunas limitaciones puesto que son dispositivos unidireccionales, no pudiendo circular la corriente en sentido contrario al de conducción.

Los diodos de potencia de mayor difusión son los de silicio, aunque existen también de germanio, estos no se comportan igual que los de silicio ante las altas temperaturas, pero son empleados para otras aplicaciones.

Su construcción consta de una sola unión PN. Esto se refiere a que una parte es de material semiconductor P y la otra es de material semiconductor N.

El material tipo P es silicio puro dopado en cierta proporción con algún elemento del grupo III, por ejemplo, boro, galio, indio. Al formarse los enlaces quedan espacios vacíos, a estos espacios les correspondería llevar un electrón por cada espacio. El resto de los electrones representan un desbalance de cargas dando lugar a un semiconductor positivo.

El material tipo N también es silicio puro, pero dopado con algún elemento del grupo V, como el fósforo, arsénico o antimonio. Después de que ambos elementos se enlazan hay un excedente de electrones, de modo que se generan bloques semiconductores negativos.

Para identificar la parte positiva y negativa en un diodo se debe observar su símbolo, de forma que el lado que muestra la cola de la flecha es el ánodo o parte positiva, mientras que la punta de la flecha es el cátodo o parte negativa.

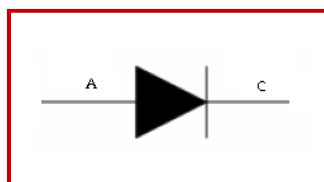


Figura 4.19. Diodo de potencia.

4.2.4.1 Bloque ‘Diode’ de Matlab-Simulink

Este bloque ‘diode’ se encuentra dentro de la biblioteca ‘Power electronics’ de Matlab-simulink.

El diodo es un dispositivo semiconductor que está controlado por su propia tensión V_{ak} e intensidad I_{ak} .

Cuando un diodo está polarizado en sentido directo ($V_{ak} > 0$), empieza a conducir una tensión directa V_f a través de él. Se apaga cuando el flujo de corriente en el dispositivo se convierte en 0.

Cuando el diodo está polarizado en sentido inverso ($V_{ak} < 0$), se queda en el estado de apagado.

El bloque ‘diode’ es simulado por una resistencia, una inductancia, y una fuente de tensión continua conectada en serie con un interruptor, el cual, es controlado por la tensión V_{ak} e intensidad I_{ak} según la figura siguiente.

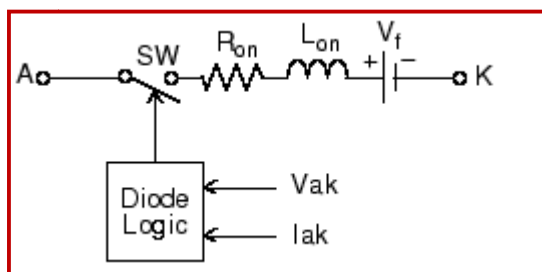


Figura 4.20. Esquema que simula el funcionamiento del bloque ‘diode’ de Matlab- Simulink

El bloque del diodo también contiene un circuito de protección en serie Rs-Cs que puede conectarse en paralelo con el dispositivo del diodo entre los nodos A y K.

Los parámetros que definen el diodo a utilizar en dicha prueba, son los que aparecen en la ventana de dialogo de dicho bloque por defecto según la siguiente figura.

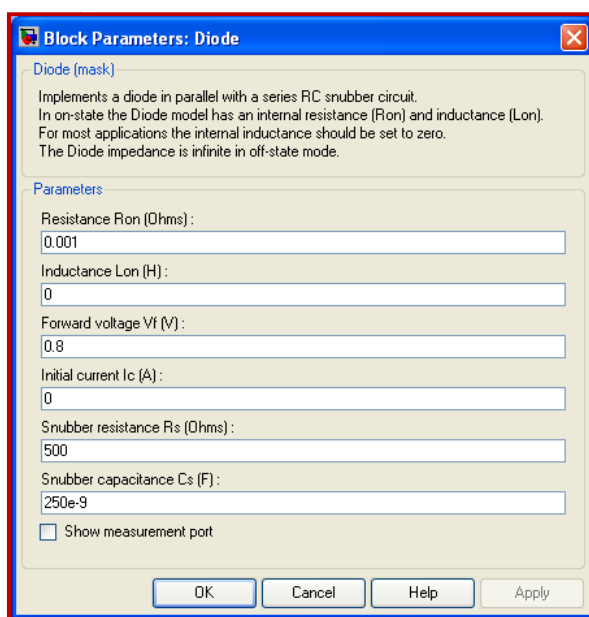


Figura 4.21. Ventana de diálogo del bloque ‘diode’ de la librería ‘Power Electronics’ Matlab-simulink

4.3 Primer modelo de panel fotovoltaico desarrollado en Matlab-Simulink.

Este primer modelo de panel fotovoltaico desarrollado, está basado el conjunto de ecuaciones descritas en el capítulo 3 (Ecuaciones 3.21-3.28).

Por razones de similitud al caso de estudio, se han extraído del artículo ‘*A Hybrid Photovoltaic PV Array-Battery Powered EV-PMDC Drive Scheme*. A.M .Sharaf, Senior Member, IEEE, E. Ozkoc, and I. H. Atlas, Senior Member, IEEE ’, los valores numéricos de los parámetros definidos en el conjunto de ecuaciones descritas en el capítulo 3.

Los parámetros que aparecen en las ecuaciones que definen el modelo de panel para este primer caso, aparecen en la tabla siguiente.

Parámetros	
$e \text{ (C)}$	$1,602 \cdot 10^{-19}$
$K \text{ (J/K)}$	$1,38 \cdot 10^{-23}$
A	6,2
$I_{ph} \text{ (A)}$	5
$I_0 \text{ (A)}$	0,0002
$R_s \text{ (}\Omega\text{)}$	0,001
$T_c \text{ (}^{\circ}\text{C)}$	20
$S_c \text{ (W/m}^2\text{)}$	100
$S_x \text{ (W/m}^2\text{)}$	102,9493
β_T	1
α_s	0,38
γ_T	2
$T_x \text{ (}^{\circ}\text{C)}$	15,6092

Tabla 4.3 Valores de los parámetros que aparecen en las ecuaciones que definen el primer modelo de panel fotovoltaico desarrollado en este proyecto.

4.3.1 Bloque final en Matlab-Simulink del primer modelo de panel fotovoltaico.

El bloque llamado '*Modelo panel fotovoltaico*' es la última etapa del modelo llevado a cabo en el programa 'Matlab-Simulink', es decir, el modelo del panel fotovoltaico está constituido por tres etapas que corresponden a los submodelos necesarios que constituyen el modelo final.

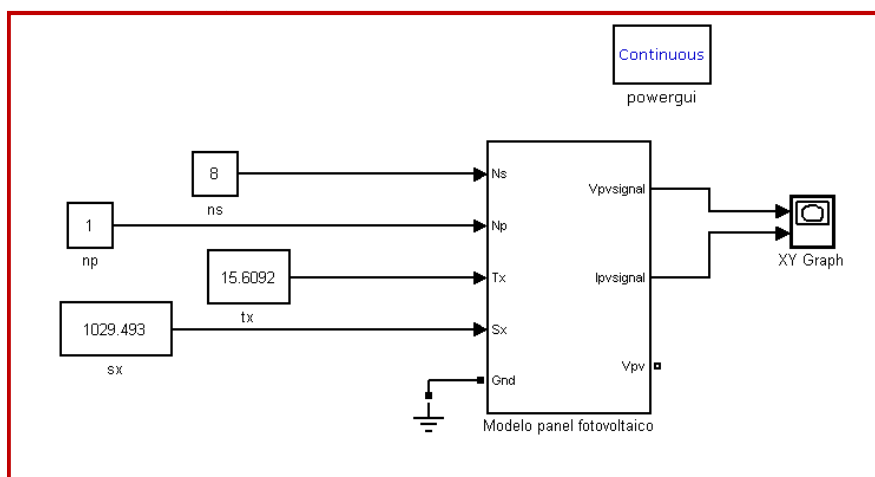


Figura 4.22. Etapa final del primer modelo que define el panel fotovoltaico (Matlab-Simulink)

El bloque del panel fotovoltaico que aparece en la Figura 4.22 corresponde al bloque 'Fcn Matlab' de la biblioteca 'User-Defined Functions' dentro de la categoría Simulink. En este bloque se distinguen cinco entradas y tres salidas.

Las entradas corresponden al número de células en serie, número de células en paralelo, nuevo valor de temperatura, nuevo nivel de radiación solar y entrada de tierra, (N_s, N_p, T_x, S_x, GND) respectivamente. Como se observa en la Figura 4.22, los valores numéricos de estas entradas son introducidos mediante una serie de bloques 'Constant' de la librería 'Sources'.

Las salidas de esta última etapa de modelo fotovoltaico, corresponden a los valores finales de tensión e intensidad, (I_{pv}, V_{pv}) respectivamente.

Debe este modo, mediante elementos 'Fcn Matlab' se crea el conjunto de sistemas que constituyen el sistema final, empezando con la construcción de la etapa final y terminando en el subsistema de partida que corresponde a la primera etapa.

El panel fotovoltaico a considerar, consiste en ocho células fotovoltaicas conectadas en serie para tener la tensión de salida deseada. Dependiendo de la potencia de la carga requerida, el número de células en paralelo puede ser incrementado en dos o más.

Los valores de nivel de irradiación y temperatura pueden ser variados según las condiciones de partida que se den en cada momento, y éstas pueden ser modificadas a partir de los bloques 'Constant' donde se definen cada uno de esos valores numéricos.

- Transport Delay de la librería ‘Continuous’, simula un retardo de tiempo. La entrada a este bloque debe ser una señal continua.
- Controlled Voltage Source de la librería ‘Electrical Source’, convierte la señal de entrada de Simulink en una fuente de tensión equivalente. El voltaje generado es impulsado por la señal de entrada del bloque.
- Saturation de la librería ‘Discontinues’, impone límites superior e inferior en la señal de entrada.

Tras construir el modelo de la segunda etapa, se procede a crear un nuevo subsistema de la forma explicada anteriormente pero seleccionando ahora el nuevo bloque que define la segunda etapa. El nuevo subsistema creado corresponderá a la primera etapa del modelo de panel fotovoltaico, el cual se modifica según el esquema siguiente.

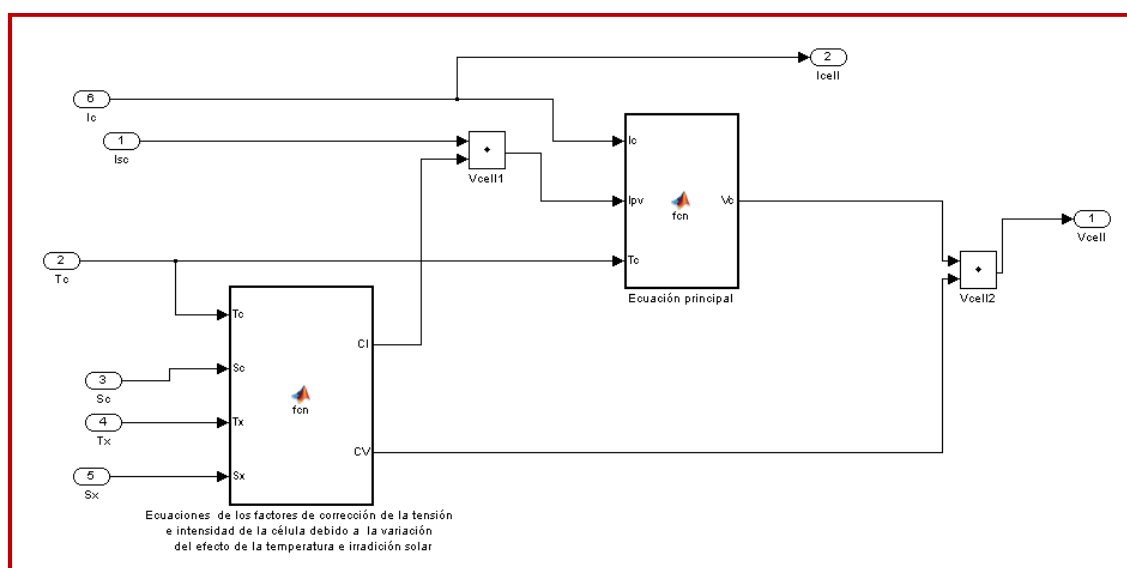
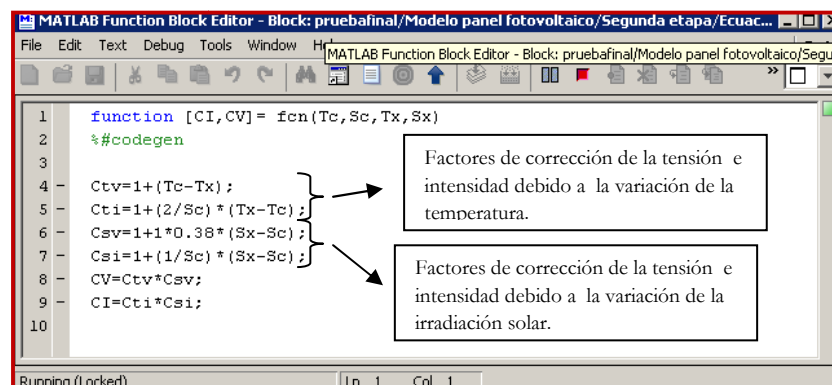


Figura 4.24. Subsistema 2. Primera etapa del modelo final del panel fotovoltaico.

Como se observa en la figura anterior, aparecen dos bloques ‘Fcn Matlab’, en los cuales han sido definidos además de unas ciertas entradas y salidas, una serie de ecuaciones que definen el comportamiento del panel fotovoltaico.

El primer bloque está constituido por cuatro entradas y dos salidas. En este bloque, han sido editadas las ecuaciones que definen los factores de corrección de la intensidad y tensión debido a la variación de los valores de radiación solar y temperatura (Ecuaciones 3.22, 3.23, 3.24 y 3.25) según la figura que sigue.



```

1 function [CI,CV]= fcn(Tc,Sc,Tx,Sx)
2 %#codegen
3
4 Ctv=1+(Tc-Tx);
5 Cti=1+(2/Sc)*(Tx-Tc);
6 Csv=1+1*0.38*(Sx-Sc);
7 Csi=1+(1/Sc)*(Sx-Sc);
8 CV=Ctv*Csv;
9 CI=Cti*Csi;
10

```

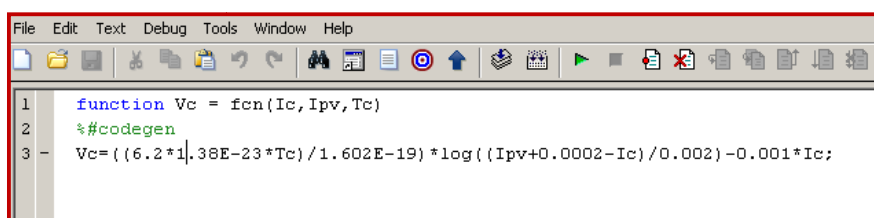
Factores de corrección de la tensión e intensidad debido a la variación de la temperatura.

Factores de corrección de la tensión e intensidad debido a la variación de la irradiación solar.

Figura 4.25. Ecuaciones que definen los factores de corrección de la tensión e intensidad según la variación de la temperatura e irradiación solar

Como se observa en la figura anterior, las entradas corresponden a la temperatura e radiación solar de referencia y la nueva temperatura e irradiación solar (T_c, S_c, T_x, S_x), respectivamente. Las salidas serán los factores de corrección de la tensión e intensidad calculados en las ecuaciones que editadas en dicho modelo, (K_V, K_I) respectivamente

El segundo bloque de la Figura 4.24 está constituido por tres entradas y una salida. En dicho modelo se ha editado la ecuación (3.21) en la que se define la primera expresión de la tensión de salida de la célula sin tener en cuenta el número de células en serie o paralelo y sin considerar los factores de corrección de la misma.



```

1 function Vc = fcn(Ic,Ipv,Tc)
2 %#codegen
3 Vc=(6.2*10^-19*(Tc-233.15)^3*log((Ipv+0.0002-Ic)/0.002)-0.001*Ic;

```

Figura 4.26. Ecuación que define la tensión de salida de la célula.

Las entradas a este segundo modelo corresponden a la Intensidad de la célula, fotocorriente y temperatura de la célula, (I_c, I_{pv}, T_c) . La salida del bloque será la tensión de salida de la célula calculada con la ecuación editada anteriormente, V_c .

4.4 Segundo modelo de panel fotovoltaico desarrollado en Matlab-Simulink.

El segundo modelo de panel fotovoltaico desarrollado en Matlab-Simulink, parte de un bloque 'Matlab-Function' de la librería 'Simulink' dentro de la opción 'User- Defined Functions'.

Este bloque creado en Matlab-simulink, consta de dos entradas (V_{pv} , Insolation) y de dos salidas (I_{pv} , P_{pv}). Finalmente, mediante los bloques 'XYGraph' se visualizan las características I-V y P-V.

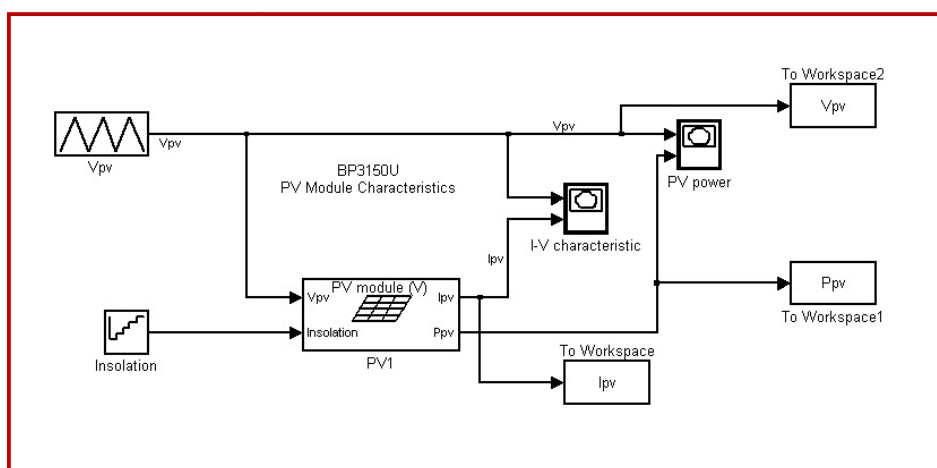


Figura 4.27. Etapa final del segundo modelo que define el panel fotovoltaico (Matlab-Simulink)

El esquema de la Figura 4.27, corresponde a la etapa final del modelo, el cual se compone de un único subsistema. De modo que, una vez definida la etapa final del modelo, seleccionado el bloque PV1 y pulsando el botón derecho del ratón, se elige la opción 'Create Subsystem'. Una vez creado el subsistema, se procederá a seleccionar 'Mask subsystem' dentro de la opción 'Edit'.

Al seleccionar 'Mask Subsystem', se está definiendo de forma detallada, algunos de los parámetros necesarios para describir cualquier modelo de un panel fotovoltaico.

Así, los parámetros a introducir en el modelo en función del panel de que se trate, se detallan en la Figura 4.28.

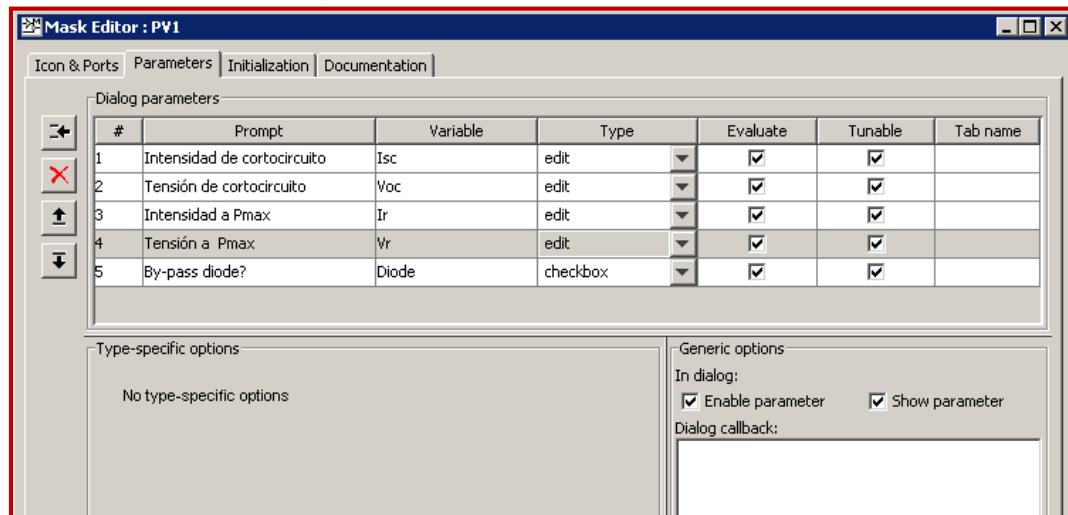


Figura 4.28. Parámetros a introducir en el modelo en función del panel fotovoltaico (Matlab-Simulink)

Los parámetros introducidos en este segundo modelo de panel, siguen las especificaciones del panel BP3150U (Anexo I), según la figura siguiente:

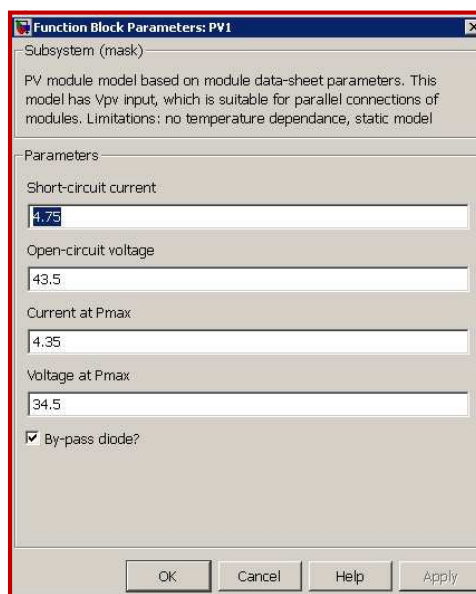


Figura 4.29. Parámetros introducidos en el segundo modelo de panel fotovoltaico desarrollado con Matlab-Simulink en este proyecto, para las especificaciones del panel BP3150U (Anexo I).

En el apartado 'Initialitation' de la ventana Mask Editor, se calculan una serie de parámetros del modelo PV, según aparece en la Figura 4.29.

En este apartado, se definen los siguientes parámetros:

- El número de células en serie por defecto, N_s
- La tensión umbral, V_t
- La irradiancia a la intensidad de cortocircuito, G
- Tensión de cada célula a máxima potencia, V_{mpp}
- Tensión de cortocircuito de cada célula, V_{OCC}
- Resistencia de carga de la célula a máxima potencia, R_{mpp}
- Tensión del diodo a máxima potencia, V_{dm}
- Intensidad del diodo a máxima potencia, I_{dm}
- Resistencia en serie de la célula, R_s
- Resistencia en paralelo de la célula, R_p
- Resistencia del diodo a máxima potencia, R_d
- Intensidad de saturación inversa del diodo, I_0

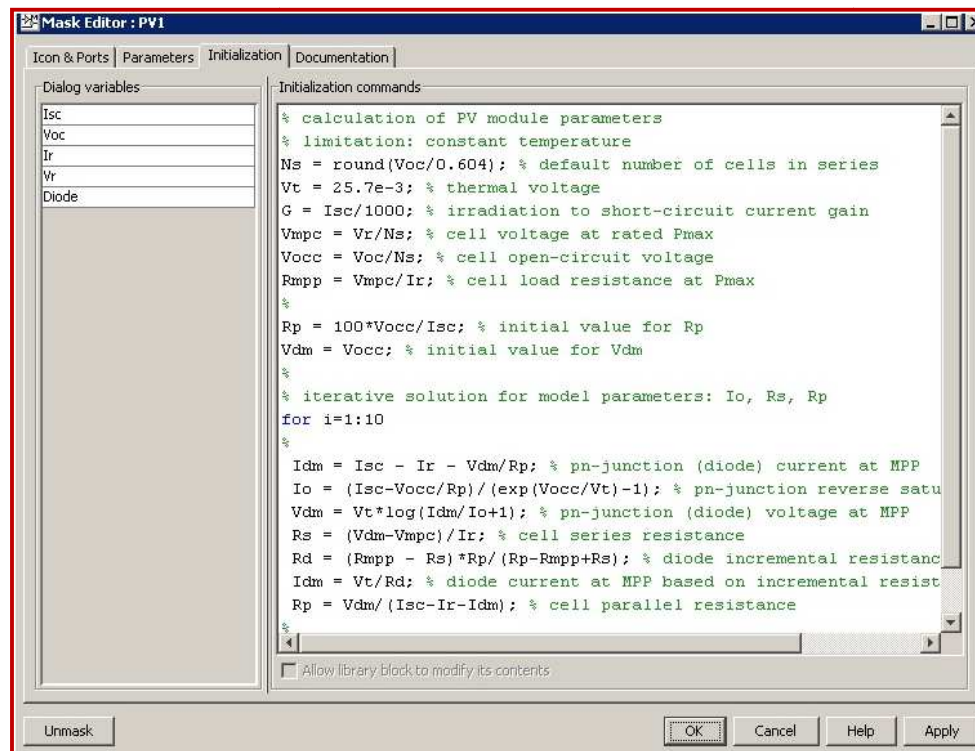


Figura 4.29. Inicialización de parámetros del modelo del panel fotovoltaico (Matlab-Simulink)

El valor de la tensión umbral es calculado a partir de la expresión que sigue:

$$V_t = \frac{n \cdot K \cdot T}{q} = 25,7 \cdot 10^{-3} \text{ V}$$

Donde:

- $n = 1$
- $K = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K.}$
- $T = 298 \text{ K}$
- $q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

CAPÍTULO 5.
ADAPCIÓN DE LOS
MODELOS Y
SIMULACIONES.

5. ADAPTACIÓN DE LOS MODELOS Y SIMULACIONES.

Dado la complejidad del esquema final del motor de corriente continua de imanes permanentes, con los correspondientes subsistemas que lo componen (panel fotovoltaico, controlador PID y bloque de motor), antes de construir el esquema final del motor de continua, se procedió a realizar una serie de pruebas para el subsistema bloque 'DC machine' de imanes permanentes sin incluir el controlador y el panel fotovoltaico, y tomando como alimentación una fuente de tensión constante.

Luego se procede a incluir el control de dicho sistema en el esquema del motor, para que una vez cubierto el objetivo de control, llevar a cabo la simulación de un modelo de panel fotovoltaico en Matlab-Simulink, y finalmente incluirlo en el esquema final que define el funcionamiento del motor.

5.1 Primera simulación.

Modelo continuo con Matlab-Simulink, de un motor de continua de imanes permanentes alimentado por una fuente de tensión constante de 100 voltios.

El caso presentado en esta simulación es el propuesto en la bibliografía consultada, en concreto, se refiere al primer caso presentado en el artículo 'Matlab/Simulink in Drives and Power electronics'.

En esta primera simulación se trabaja con funciones continuas y con un motor de corriente continua de imanes permanentes con los siguientes datos de partida:

R_a	L_a	T_L	K_t	T_f	B_m	J_m	w_0	V_m
(Ω)	(H)	(N·m)	(N·m/A)	(N·m)	(N·m·s)	(Kg · m ²)	(rad/s)	(V)
0,5	0,01	4	0,5	0,1	0,01	0,05	0	100

Tabla 5.1. Datos de partida del bloque motor de la primera simulación.

El esquema de este modelo aparece en la Figura 5.1, y como se puede observar en dicho esquema, se ha incluido el elemento 'PowerGUI' de continua para indicar a Matlab-Simulink que se está trabajando con funciones continuas.

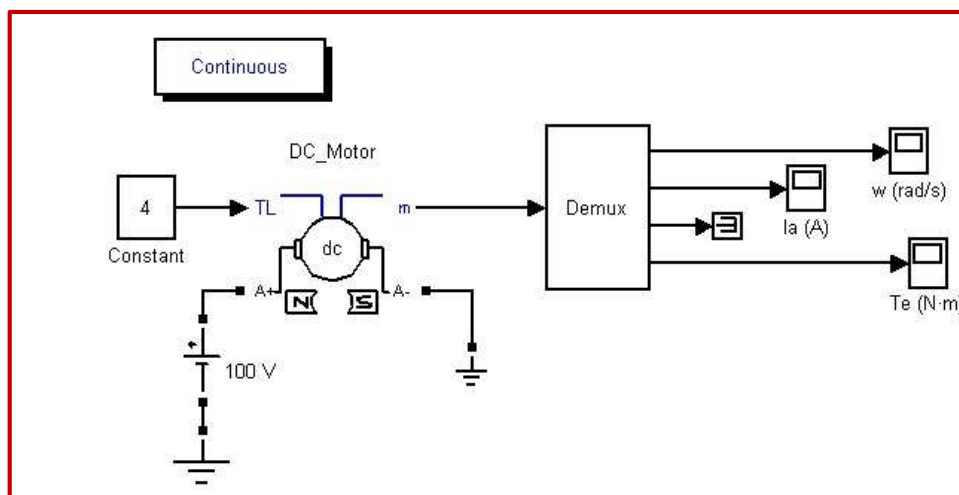
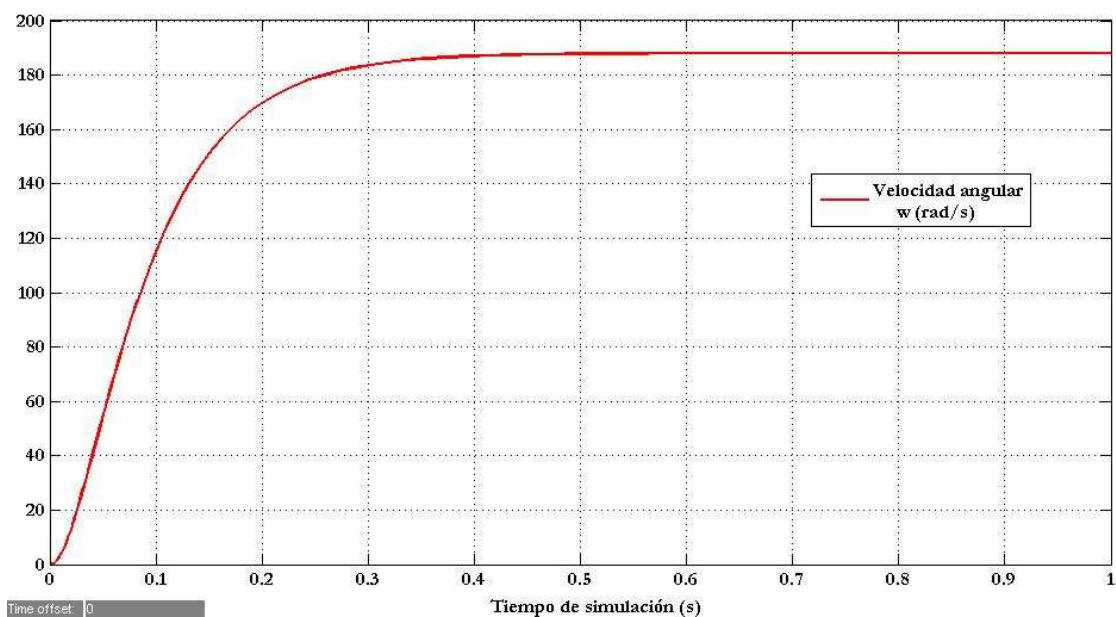


Figura 5.1. Esquema del modelo motor de continua de la primera simulación con Matlab-Simulink

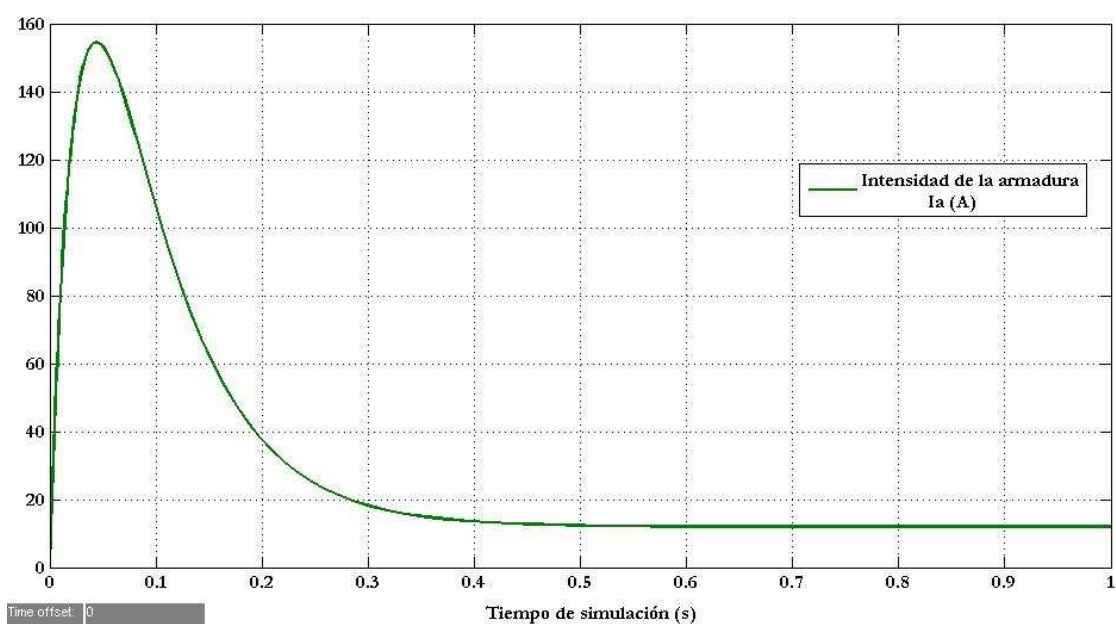
El valor inicial de la velocidad angular ($w = 0$) se especifica en el bloque motor, sin embargo, la condición inicial de intensidad de la armadura no se especifica en dicho bloque. Como consecuencia de ello, puede dar como resultado de la simulación gráficos de intensidad y par erróneos.

Por tanto, si no se indica dicha condición inicial, Matlab-Simulink toma como valor inicial un valor próximo al máximo valor al que llega dicha variable. En consecuencia, es importante antes de comenzar la simulación, modificar la condición inicial de intensidad de la armadura ($Ia = 0$) en el bloque 'PoweGui continuous'. Esto se realiza haciendo doble clic en dicho elemento y seleccionando en el apartado 'Initial States Setting' la opción 'force Initial Electrical State to zero'

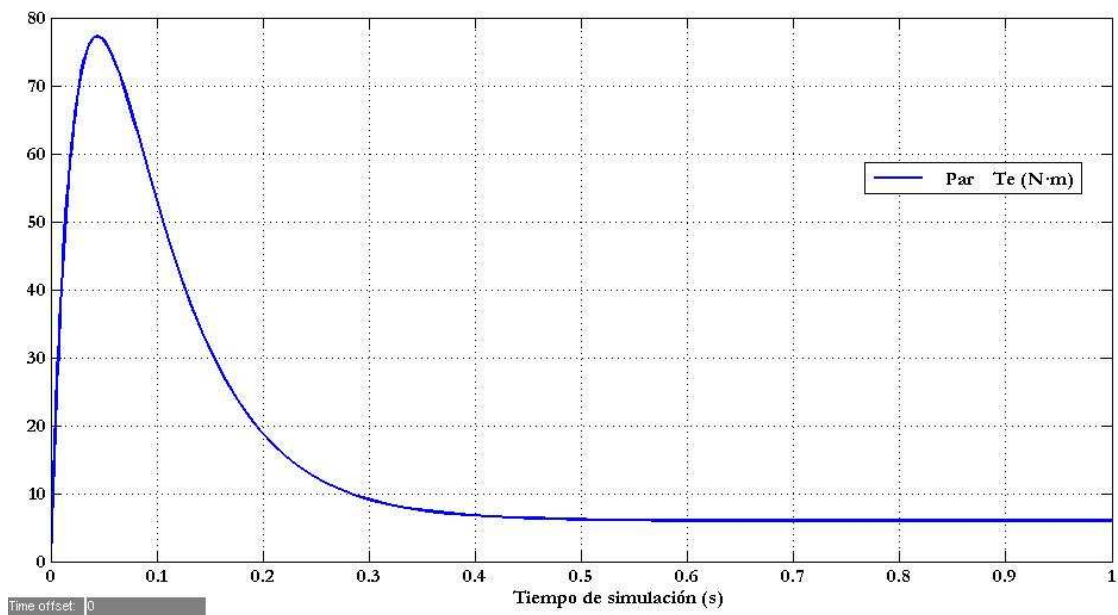
Los resultados de dicha simulación aparecen en las Gráfica 5.1, 5.2, 5.3. Dichas gráficas corresponden a la variación de la velocidad angular, intensidad de la armadura y par electromagnético a lo largo del tiempo desde el instante inicial hasta el tiempo en que se estabiliza la señal, es decir, desde 0 a 1 segundo.



Gráfica 5.1. Velocidad angular en función del tiempo de simulación. Simulación 1.



Gráfica 5.2. Intensidad de la armadura en función del tiempo de simulación. Simulación 1.



Gráfica 5.3. Par electromagnético en función del tiempo de simulación. Simulación 1.

5.2 Segunda simulación.

Modelo continuo con Matlab-Simulink, del motor de continua de imanes permanentes objeto de estudio, alimentado por una fuente de tensión constante de 36 voltios.

La segunda simulación que se realizó fue para el caso (en particular) del motor de continua de imanes permanentes, considerando al igual que en la primera simulación, que se está trabajando con funciones continuas y alimentando el motor con una fuente de tensión constante de 36 V.

La figura que aparece a continuación corresponde al esquema del modelo de dicho motor.

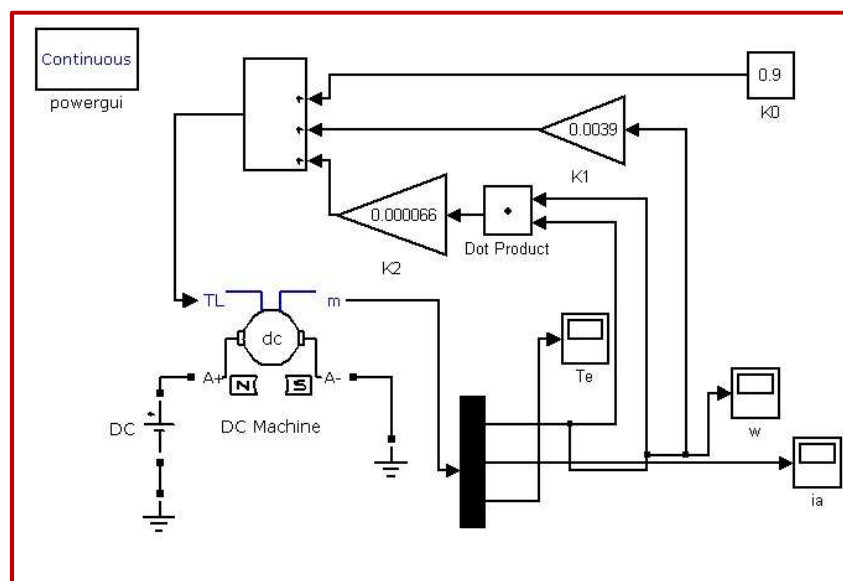
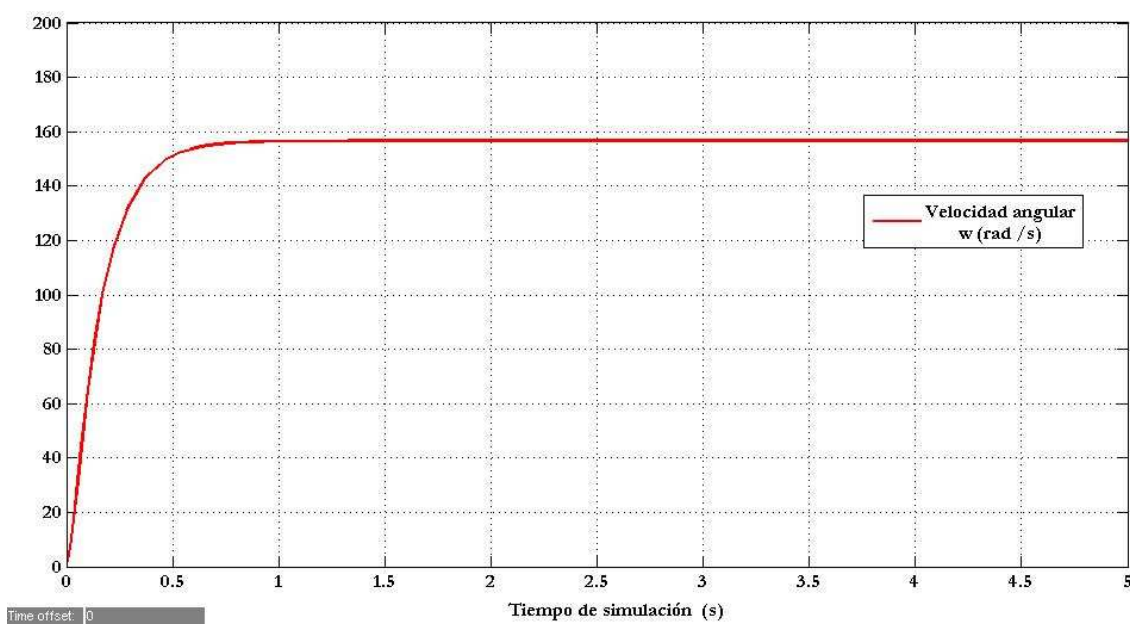
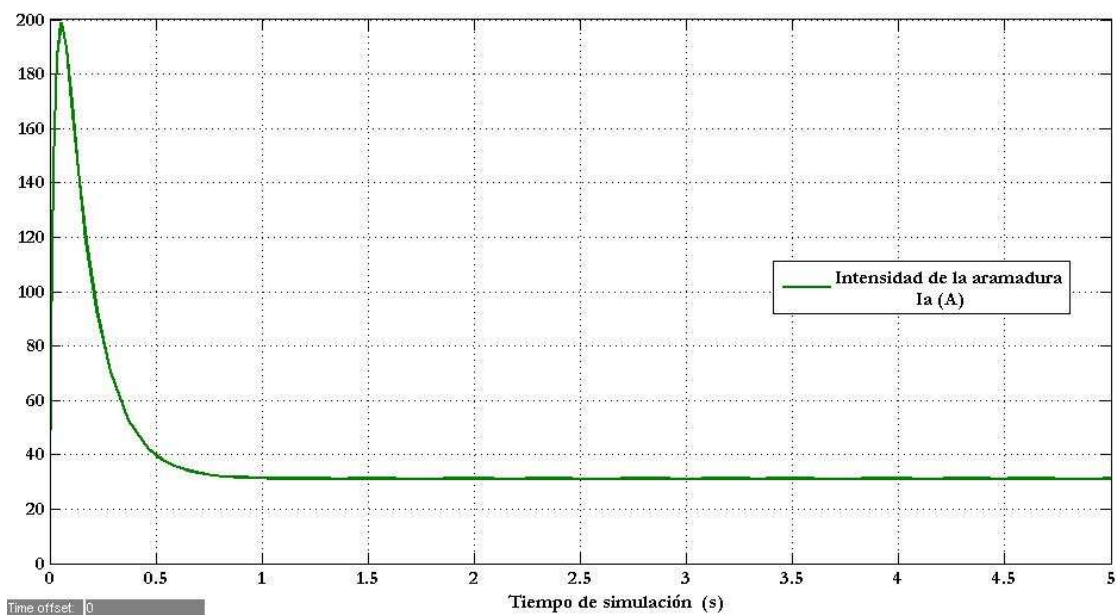


Figura 5.2. Esquema del modelo de motor de continua de la prueba 2 con Matlab-Simulink.

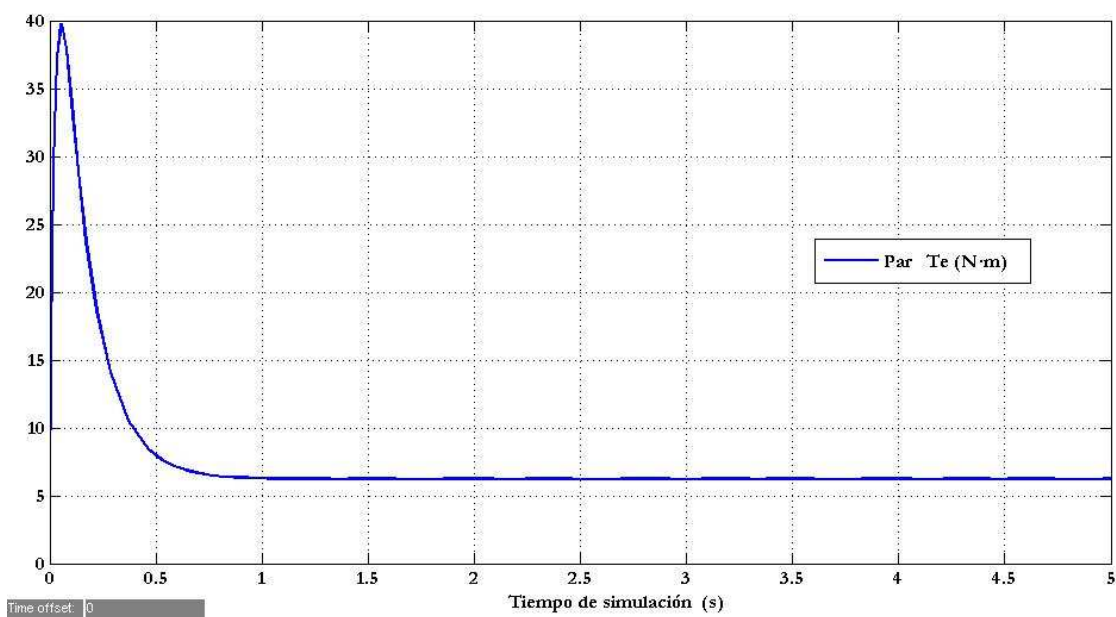
Los resultados de la simulación de dicho modelo aparecen en las siguientes gráficas. En dichas gráficas está representada la velocidad angular, intensidad de la armadura y par en función del tiempo de simulación, en su caso, de 5 segundos ya que ambas variables alcanzan un valor estable antes de ese instante de tiempo.



Gráfica 5.4. Velocidad angular en función del tiempo se simulación. Simulación 2.



Gráfica 5.5. Intensidad de la armadura en función del tiempo de simulación. Simulación 2.



Gráfica 5.6. Par electromagnético en función del tiempo de simulación. Simulación 2.

Como se puede observar en los gráficos 5.4, 5.5 y 5.6, en esta prueba se obtiene unas señales de salida de velocidad angular, intensidad de la armadura y par similares a las obtenidas con la programación con el editor de Matlab, del sistema de ecuaciones diferenciales no lineales que definen el comportamiento del motor de continua de imanes permanentes y que se resolvió con el modelo iterativo Runge-Kutta de cuarto orden con el editor.

5.3 Tercera simulación.

Modelo discreto modificado de primera prueba añadiendo dispositivos de potencia.

En esta tercera simulación se complicará el esquema de la primera simulación, añadiendo al esquema propuesto en la misma, el bloque IGBT, un diodo y un bloque generador de pulsos, según el artículo mencionado en la primera simulación.

Antes de obtener los gráficos resultantes de esta simulación, en los subapartados siguientes se realizará una explicación teórica de algunos de los bloques de Matlab-Simulink introducidos en el modelo eléctrico discreto de esta simulación, no explicados en el presente proyecto hasta el momento.

El esquema que aparece a continuación corresponde al modelo de la tercera simulación. Como se puede observar, el bloque Powergui de continua de las simulaciones anteriores ahora corresponde a un modelo eléctrico discreto debido a que se han añadido elementos que exigen tal consideración para que la simulación sea aceptable (Diodo, IGBT). Para el caso de esta simulación, el tiempo de muestra seleccionado es de $10 \mu s$.

En el capítulo 4 se han definido algunos de los elementos que aparecen en el esquema de la Figura 5.3, tales como el bloque Igbt y diode.

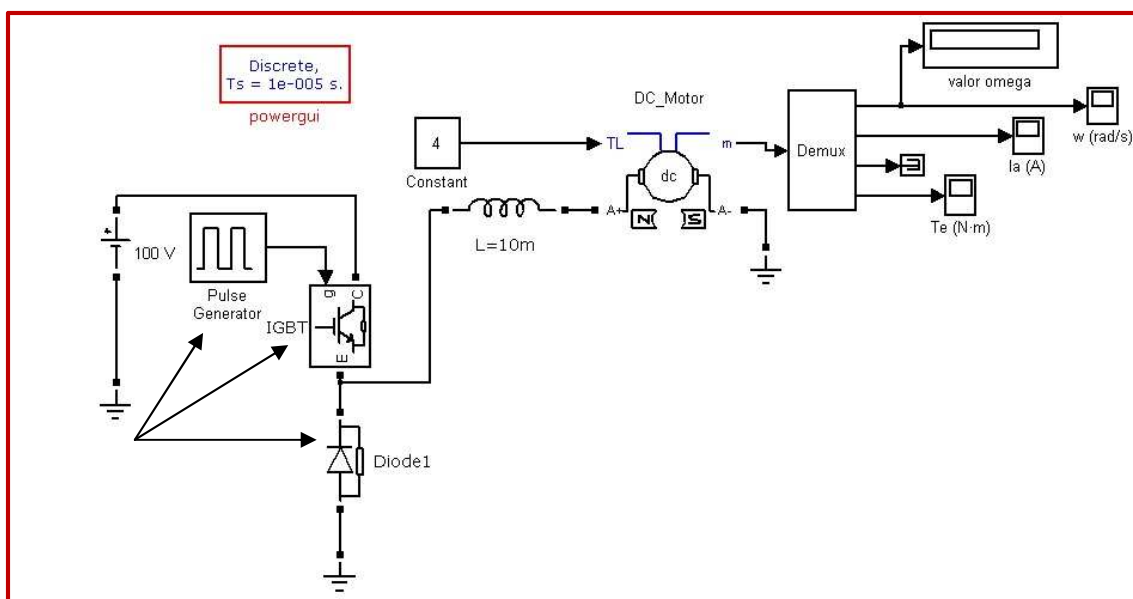


Figura 5.3. Esquema del modelo del motor de continua de la simulación 3 con Matlab- Simulink

A continuación se procede a explicar el elemento ‘Powergui discrete’ y el bloque ‘Pulse Generator’ (Generador de pulsos) de Matlab-Simulink.

5.3.1 Simulación de sistemas eléctricos discretos.

Para llevar a cabo una buena simulación, se modifican algunos de los parámetros dentro de ‘Configuration Parameters’ de la opción ‘Simulation’ de la ventana de simulink según la figura siguiente.

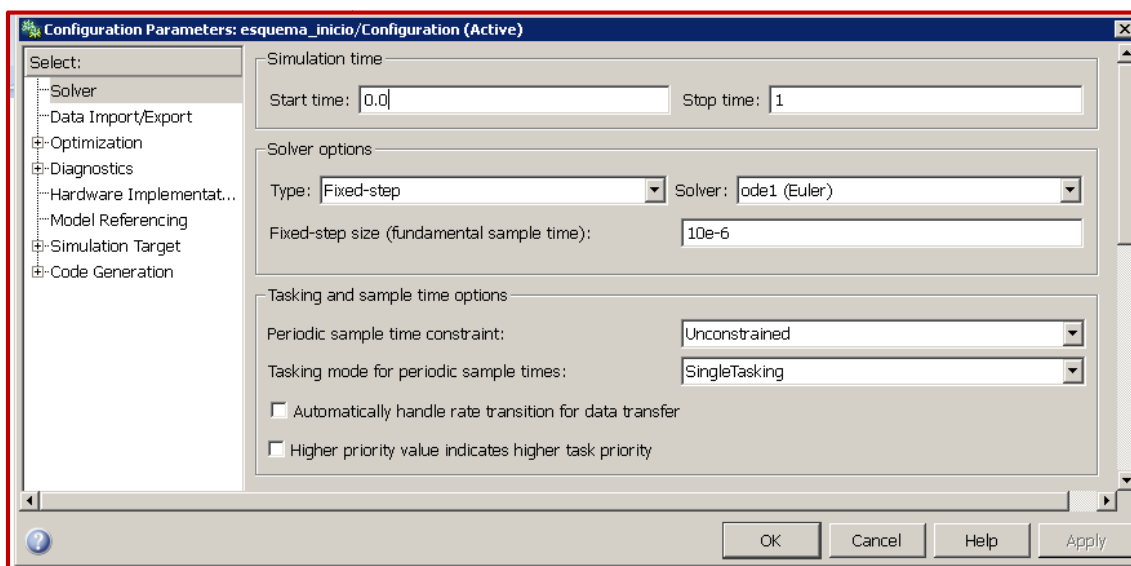


Figura 5.4. Configuration parameters (Simulation). Simulación 2.

Todo sistema eléctrico se discretiza utilizando el método de Tustin, que es equivalente a una integración trapezoidal fijo-paso, pero con el fin de evitar bucles algebraicos, las máquinas eléctricas son discretizadas utilizando el método de Euler.

Como se observa en la Figura 5.4, la simulación tiene lugar entre 0 y 1 s, empleando el método de Euler para un paso fijo de $10 \mu\text{s}$.

La precisión de la simulación es controlada por el tiempo de paso que se elija para la discretización.

Si se utiliza un tiempo de muestreo demasiado grande, la precisión podría no ser suficiente, por tanto, la única manera de saber si es aceptable la simulación, es repetir la misma con diferentes tiempos de muestra. Por lo general, los tiempos de muestreo de $20 \mu\text{s}$ y $50 \mu\text{s}$ dan buenos resultados para la simulación de transitorios de conmutación de 50 Hz o 60 Hz o sistemas de energía en sistemas que utilizan dispositivos electrónicos de potencia conmutados por la red, como los diodos y tiristores.

Sin embargo, para sistemas que utilizan interruptores electrónicos de potencia (IGBT), se debe reducir el tiempo de paso.

En el caso de esta tercera simulación, además de emplear un dispositivo de potencia conmutado por la red (diodo), se emplea un interruptor de potencia conmutada, de ahí el motivo de emplear un tiempo de muestra inferior a $20\ \mu\text{s}$ (en este caso $10\ \mu\text{s}$).

5.3.2 Generador de pulsos en Matlab-simulink

El bloque 'Pulse generator' se encuentra dentro de la opción 'Source' de la librería 'Simpower – System' de Matlab- Simulink.

La función de este bloque es generar pulsos cuadrados de onda a intervalos regulares, para ello, deberán indicarse los parametros de forma de onda en la ventana de diálogo de dicho bloque.

Los parámetros de forma de onda amplitud, ancho de pulso, periodo y retraso de fase son representados en la siguiente figura.

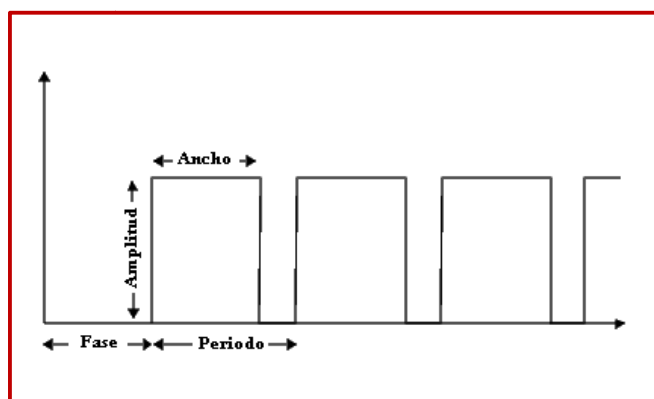


Figura 5.5. Parámetros de forma de onda del generador de pulsos.

Los valores numéricos de los parámetros que definen al generador de pulsos se indican en la ventana de diálogo de dicho bloque según la figura siguiente.

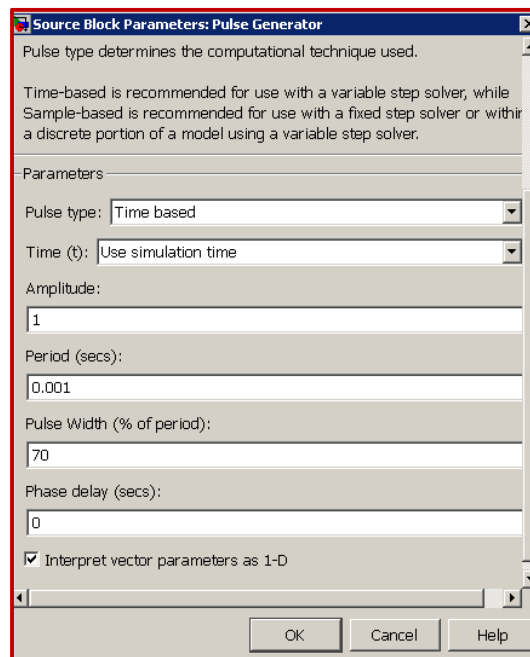


Figura 5.6. Parámetros de forma de onda que definen al bloque ‘Pulse Generator’ de Matlab-Simulink.

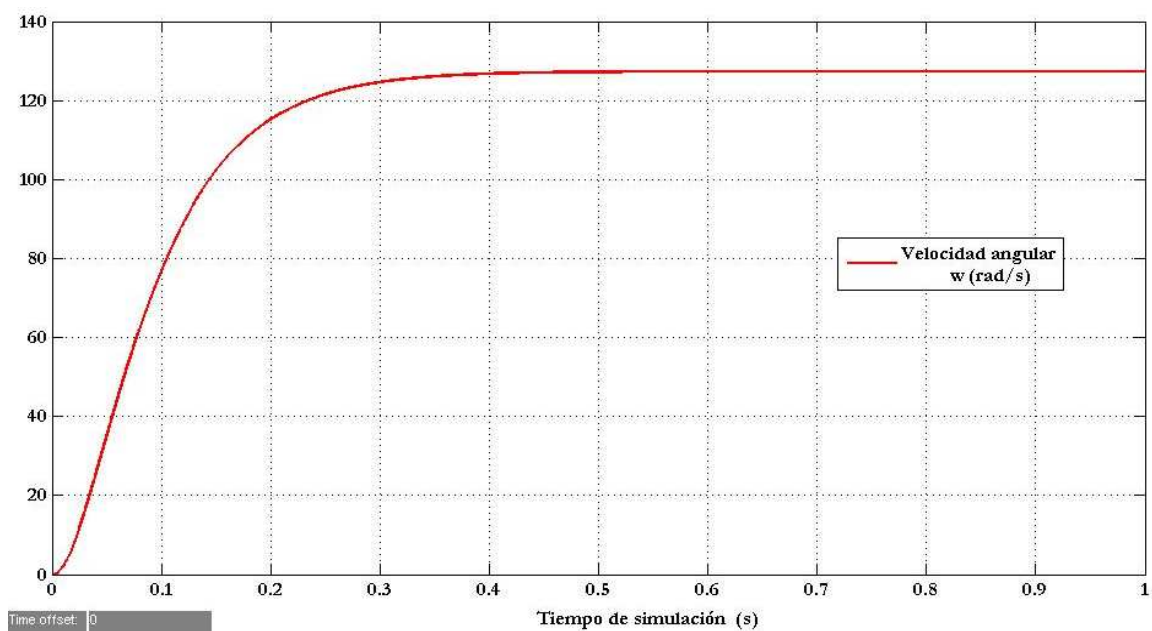
Como se puede apreciar en la Figura 5.5, la amplitud de la señal es 1, el periodo es de 1 ms , el ancho de pulso es del 70 % y no hay retraso de fase.

5.3.3 Funcionamiento del esquema y resultados de la tercera simulación.

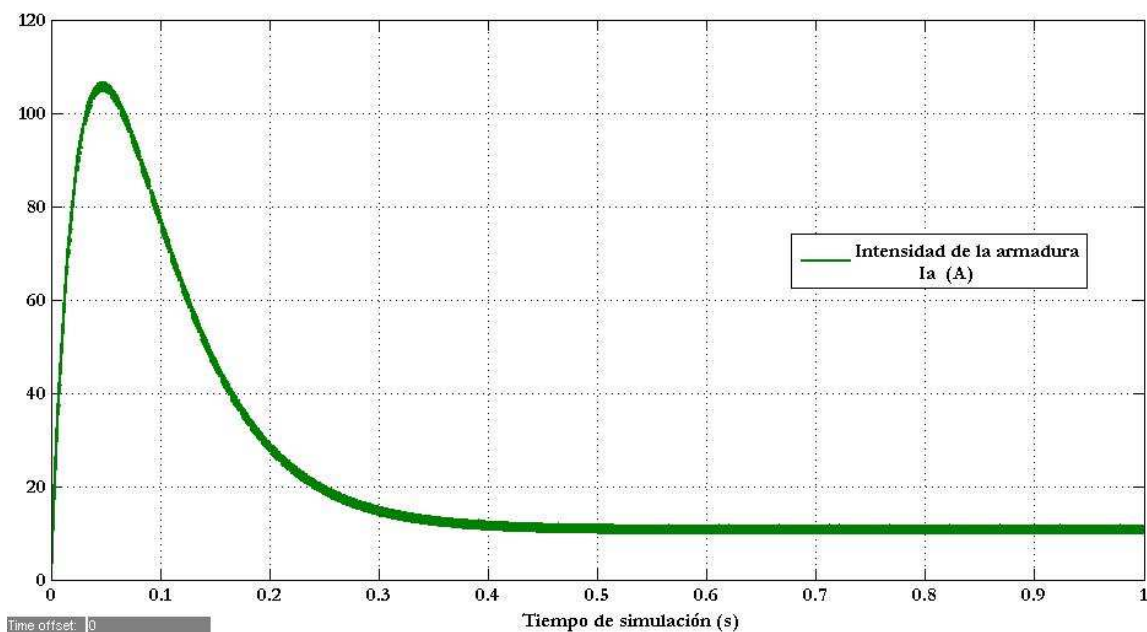
En la Figura 5.3, aparecen los elementos anteriormente descritos (IGBT, diodo y generador de pulsos). La fuente de tensión constante alimenta con 100 V al motor de continua de imanes permanentes. El flujo de corriente aplicado a la carga es regulado por un transistor de compuerta aislada (IGBT) de manera que la corriente entra por el colector y sale por el emisor. El generador de pulsos controla la operación del transistor como un interruptor generando pulsos según un periodo de 1 ms y un ciclo de trabajo del 70%.

El diodo está conectado entre tierra y el terminal emisor del bloque igbt, de modo, que el ánodo esta conectado a tierra mientras que el cátodo esta unido al terminal emisor del IGBT. La función del diodo será evitar corriente de flujo inversa.

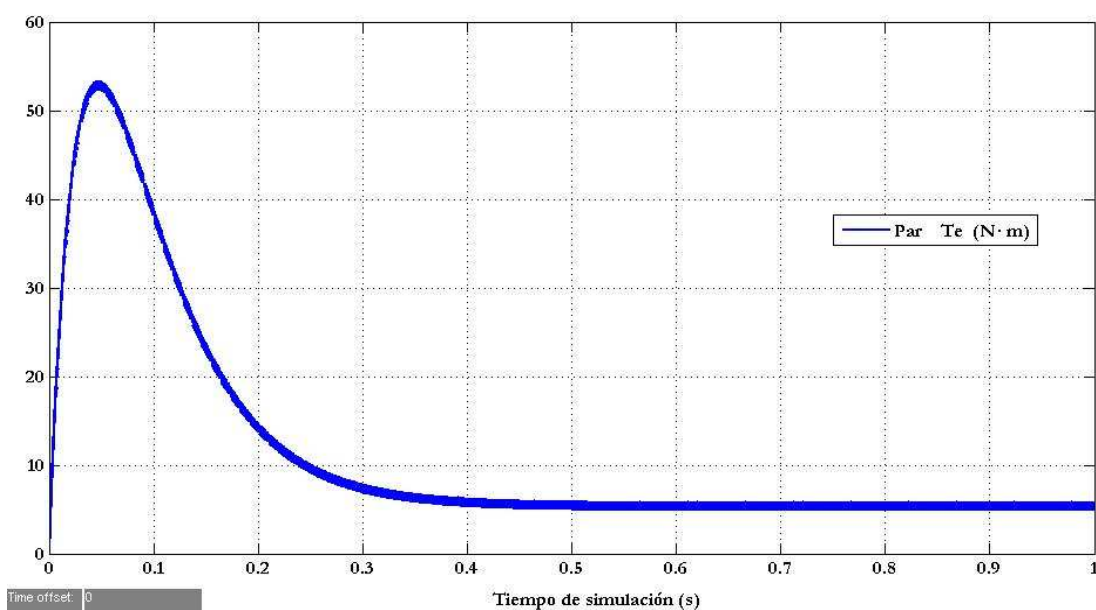
Las gráficas que aparecen a continuación definen el comportamiento a lo largo del tiempo de simulación (1s) de la velocidad angular, intensidad de la armadura y par para el caso tratado en esta tercera simulación.



Gráfica 5.7. Velocidad angular en función del tiempo de simulación. Simulación 3.



Gráfica 5.8. Intensidad de la armadura en función del tiempo de simulación. Simulación 3.



Gráfica 5.9. Par electromagnético en función del tiempo de simulación. Simulación 3.

5.4 Cuarta simulación.

Modelo discreto modificado de la segunda prueba añadiendo dispositivos de potencia.

En esta cuarta simulación se ha procedido como en el caso anterior pero modificando el esquema de la segunda simulación relativo al sistema de estudio de este proyecto.

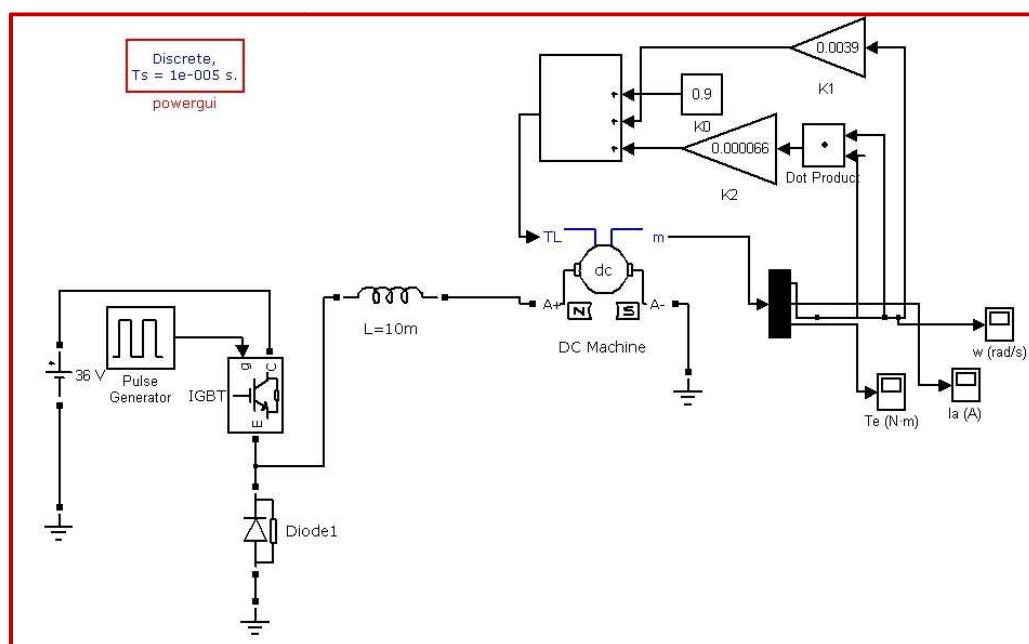
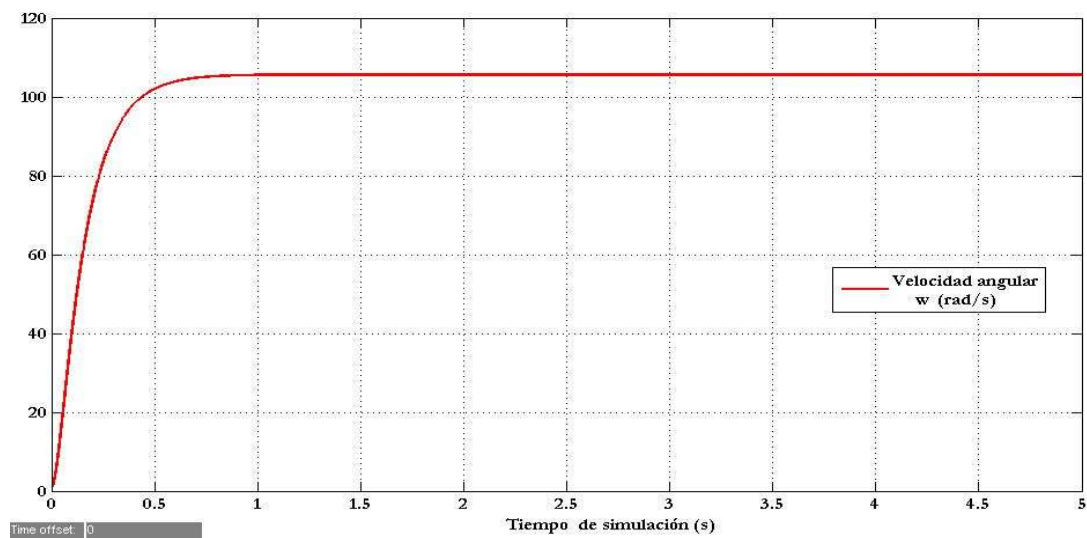
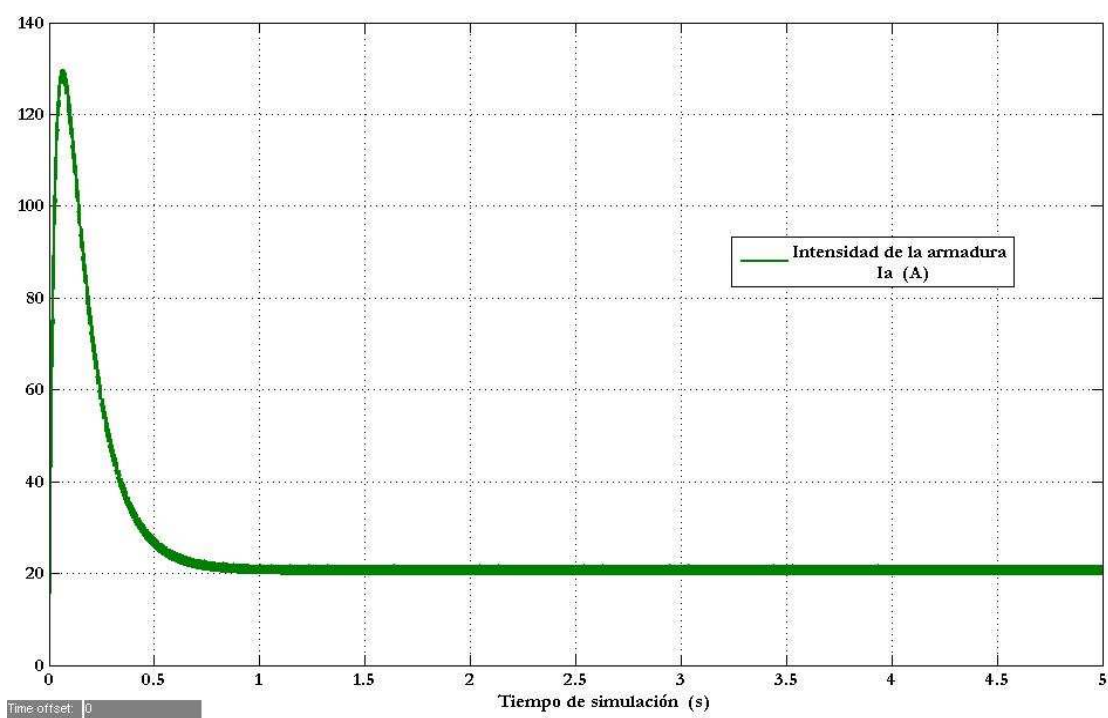


Figura 5.7. Esquema del modelo del motor de continua de la simulación 4 con Matlab- Simulink.

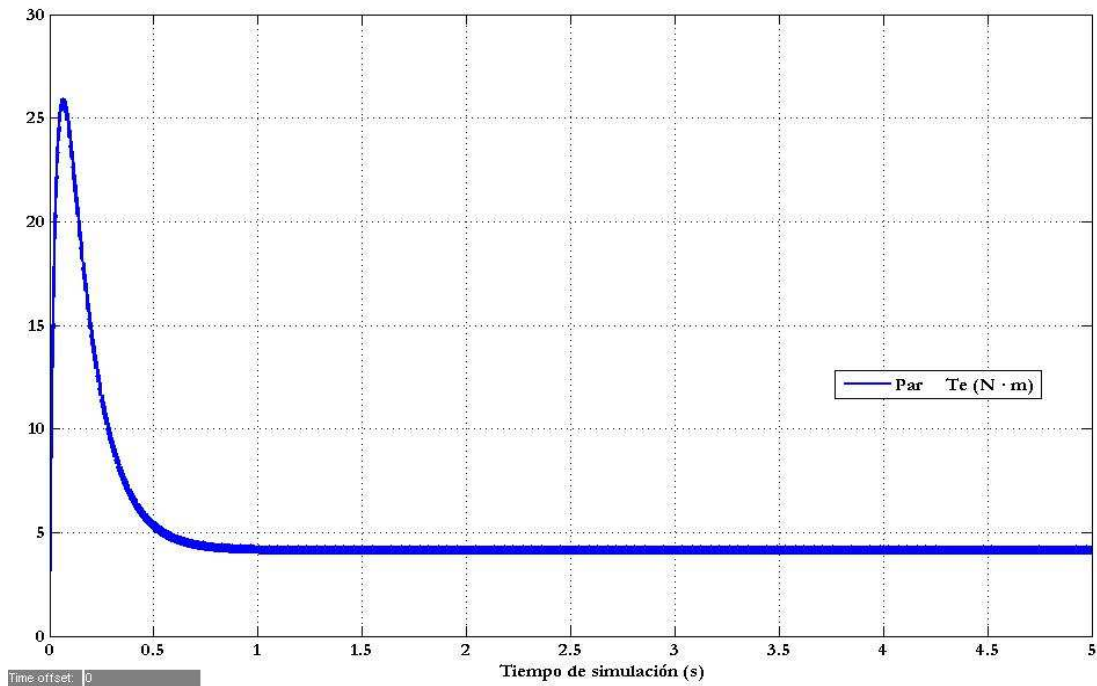
Los resultados obtenidos en esta simulación aparecen en las Gráficas 5.10, 5.11 y 5.12. Como se puede apreciar con respecto al caso presentado en la segunda simulación, las señales de velocidad angular, intensidad de la armadura y par se alejan de los valores máximos alcanzados en la misma. Esto ocurre igual en la tercera simulación respecto de la primera, como consecuencia de incluir en los esquemas dispositivos de potencia.



Gráfica 5.10. Velocidad angular en función del tiempo de simulación. Simulación 4.



Gráfica 5.11. Intensidad de la armadura en función del tiempo de simulación. Simulación 4.



Gráfica 5.12. Par electromagnético en función del tiempo de simulación. Simulación 4.

5.5 Quinta simulación.

Modelo discreto modificado de la tercera prueba y regulación de la velocidad angular.

Esta simulación se compone de dos casos en función de los valores de momento de inercia y ganancia proporcional.

5.5.1 Primer caso ($G = 2$ y $J = 0,05$).

El siguiente modelo parte del esquema de la tercera prueba, pero incluyendo en el anterior modelo, el control de la velocidad angular del motor mediante una señal constante de 100 rad/s y limitando la intensidad mediante un limitador.

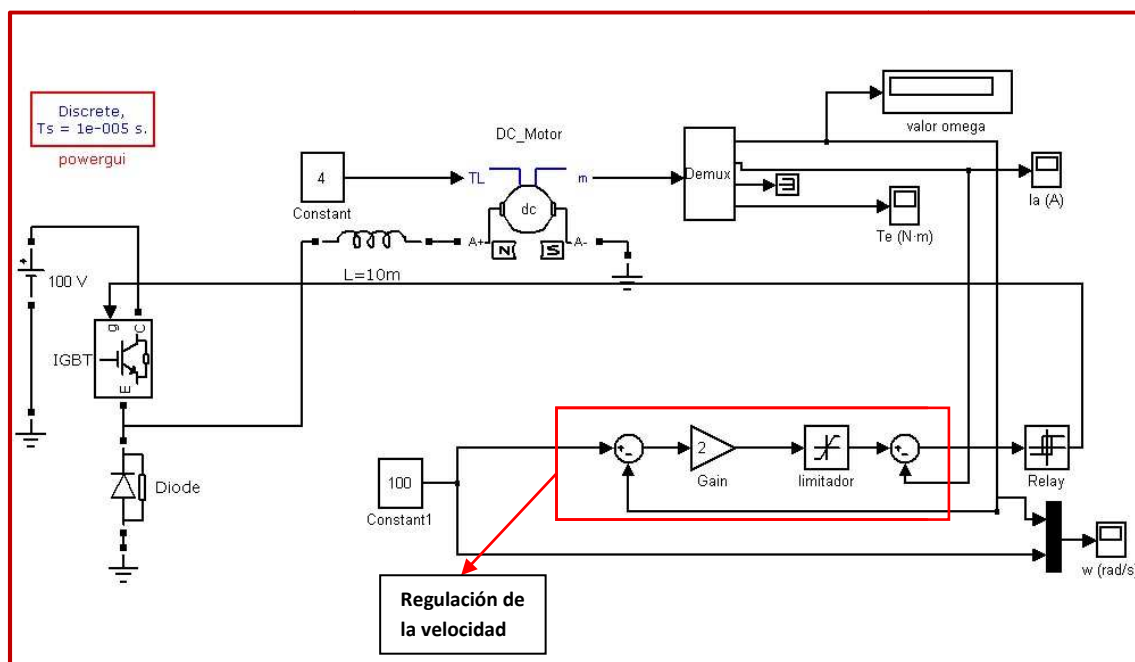
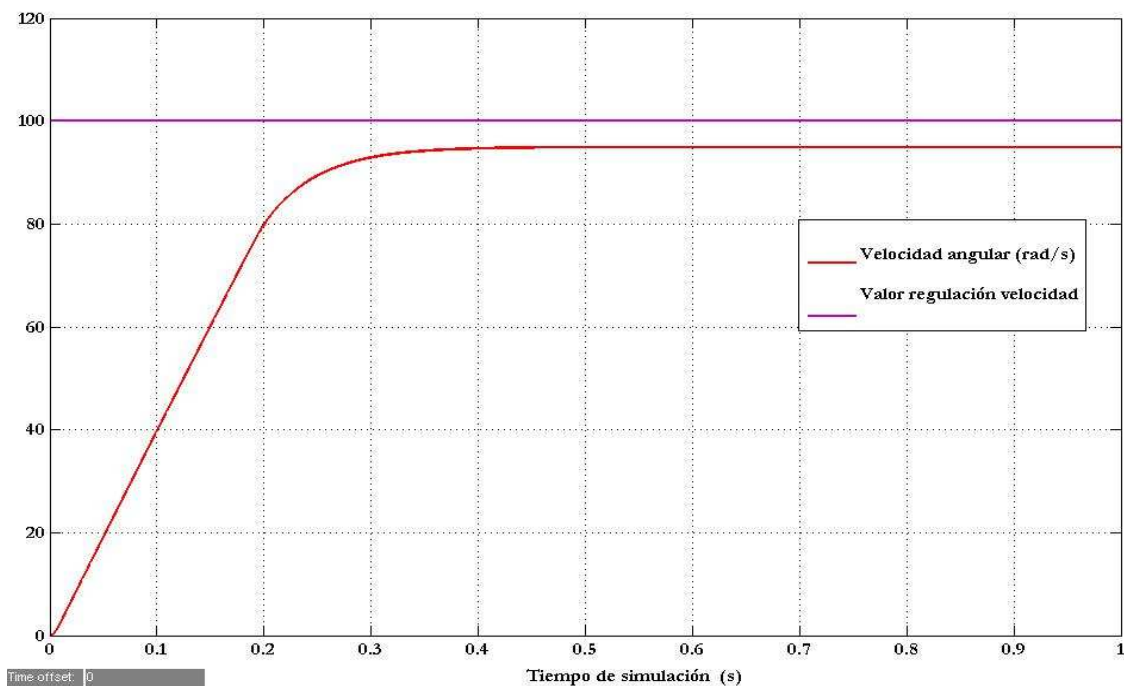
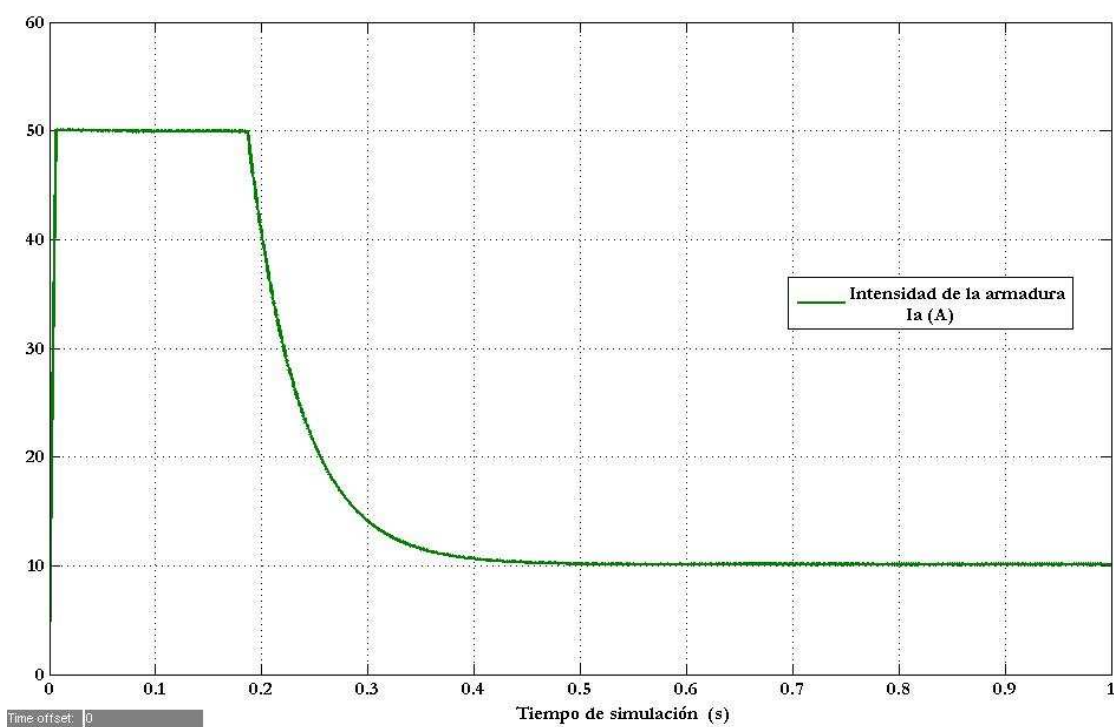


Figura 5.8. Esquema del modelo del motor de continua de la simulación 5 con Matlab- Simulink.

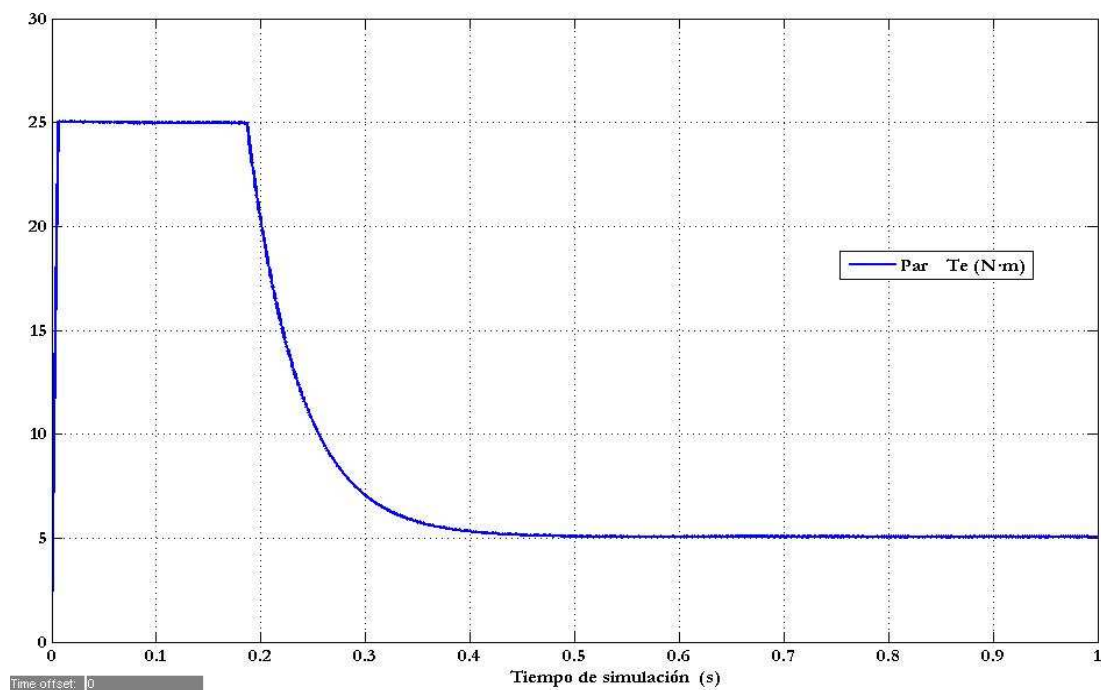
Los resultados obtenidos con esta simulación aparecen en las siguientes gráficas. Como se puede apreciar en dichos resultados, se produce una regulación de la velocidad angular entorno al valor de 100 rad/s , además de la limitación de las señales de intensidad de la armadura y par.



Gráfica 5.13. Velocidad angular en función del tiempo de simulación. Simulación 5.

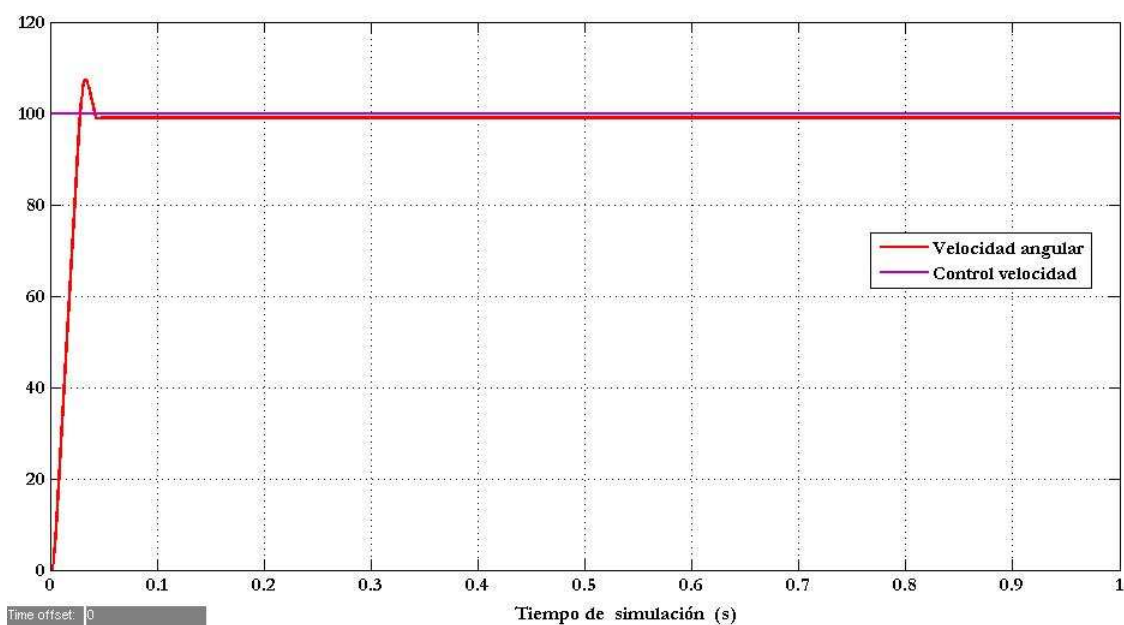


Gráfica 5.14. Intensidad de la armadura en función del tiempo de simulación. Simulación 5.

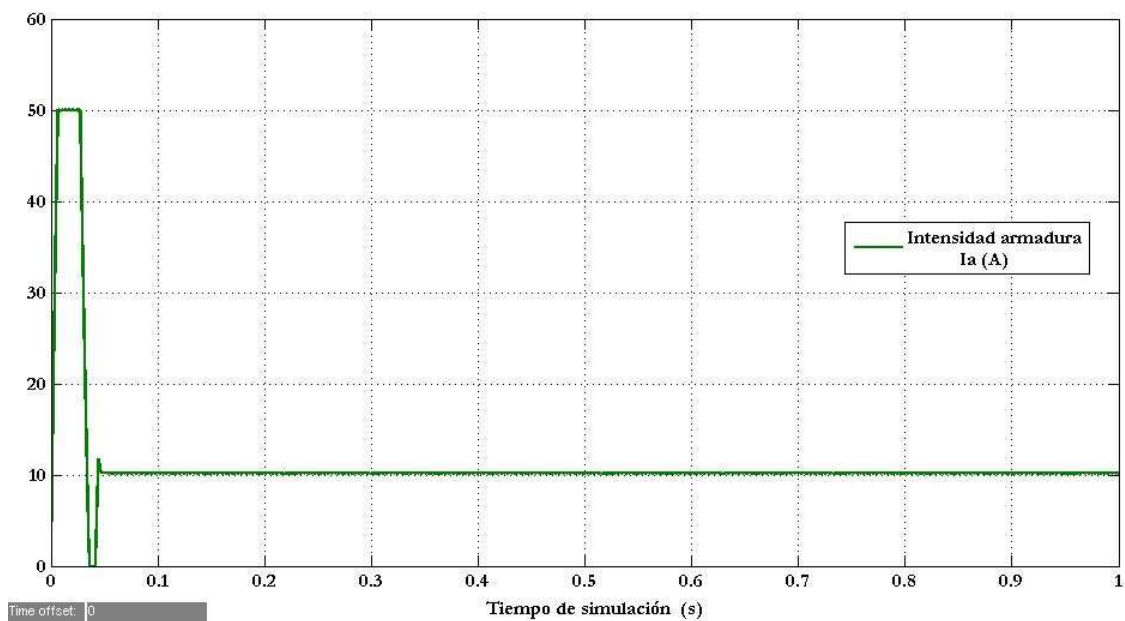


Gráfica 5.15. Par electromagnético en función del tiempo de simulación. Simulación 5.

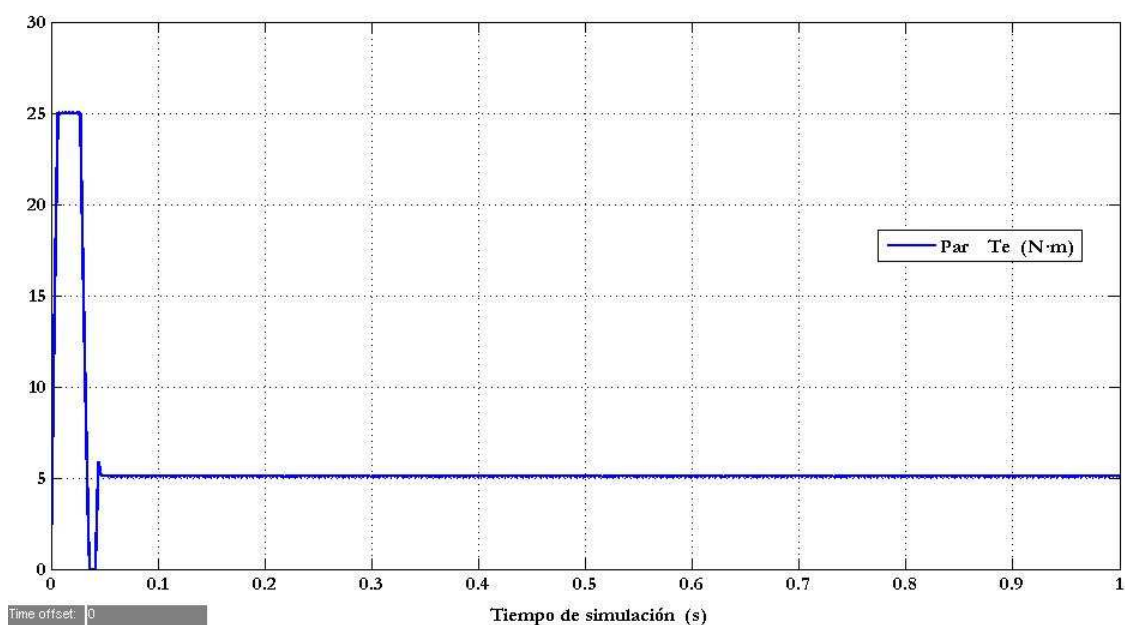
5.5.2 Segundo caso ($G = 10$ y $J = 0,005$)



Gráfica 5.16. Velocidad angular en función del tiempo de simulación. Simulación 5.



Gráfica 5.17. Intensidad de la armadura en función del tiempo de simulación. Simulación 5.



Gráfica 5.18. Par electromagnético en función del tiempo de simulación. Simulación 5.

5.6 Sexta simulación.

Modelo discreto modificado de la cuarta prueba introduciendo un bloque secuencia.

5.6.1 Primer caso ($G = 2$ y $J = 0,05$).

El modelo presentado en esta simulación, parte del anterior caso pero sustituyendo el bloque 'Constant' empleado en la regulación de la velocidad angular del motor, por un bloque secuencia 'Repeating Sequence' de la librería 'Source' dentro de Simulink (Figura 5.9).

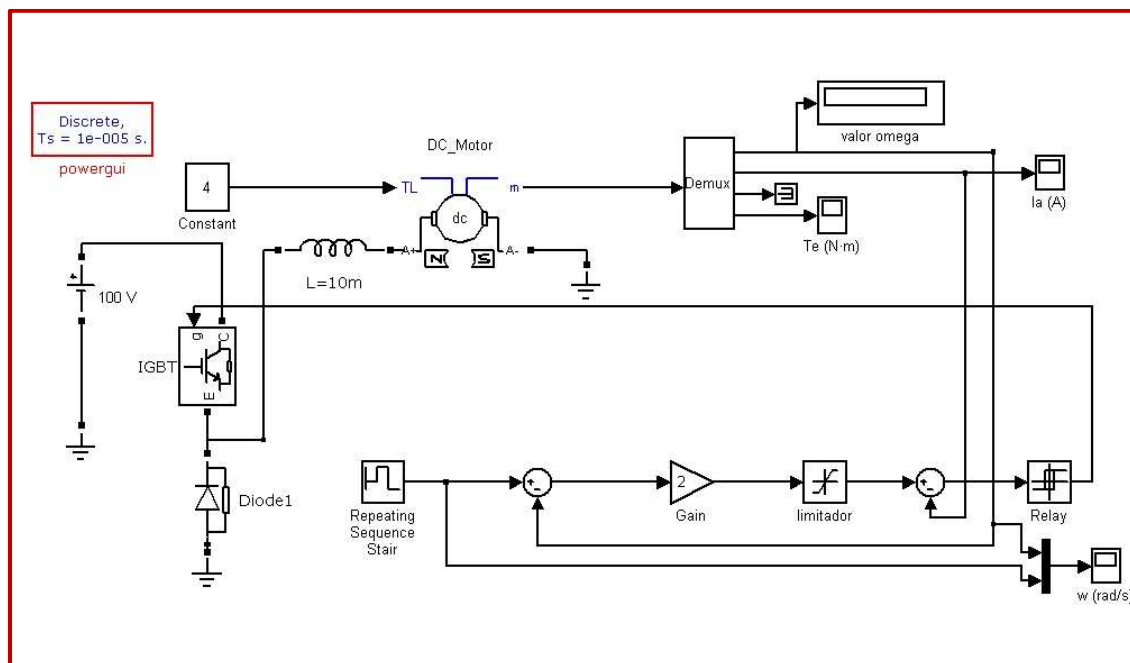


Figura 5.9 Esquema del modelo del motor de continua de la simulación 6 con Matlab- Simulink

La secuencia de entrada de la velocidad angular se muestra en figura siguiente según la ventana de diálogo de dicho bloque. Como se puede observar, la señal de referencia se basa en una señal escalón que pasa cada 0,5 s de un valor a otro (50, 100 y 30 rad/s).

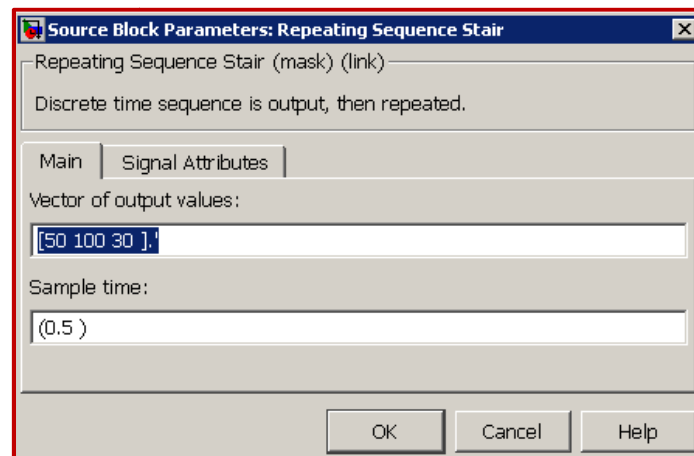
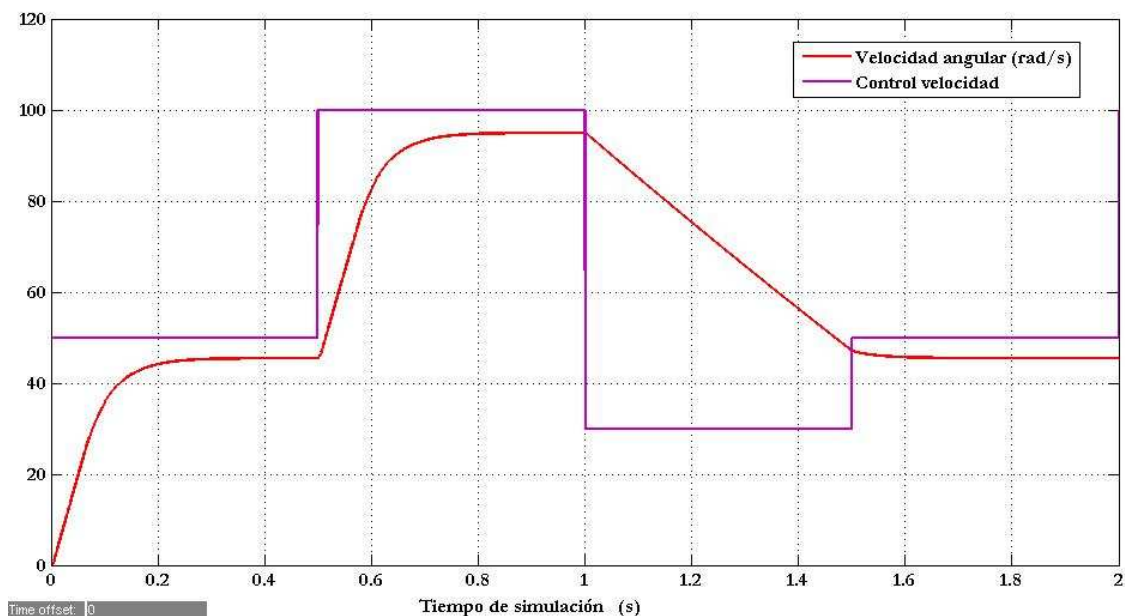


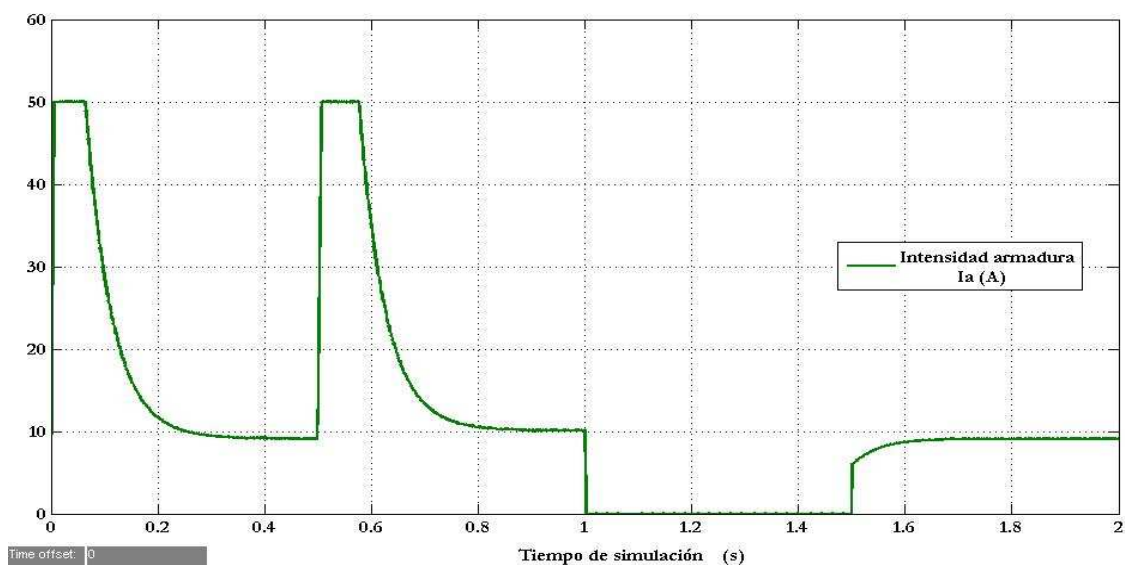
Figura 5.10. Ventana de diálogo del bloque 'Repeating Sequence' de la librería 'Source'

La regulación de la velocidad angular en este caso, produce una gran variación de los resultados de la simulación (Gráficas 5.19, 5.20 y 5.21) con respecto a la simulación primera del caso anterior.

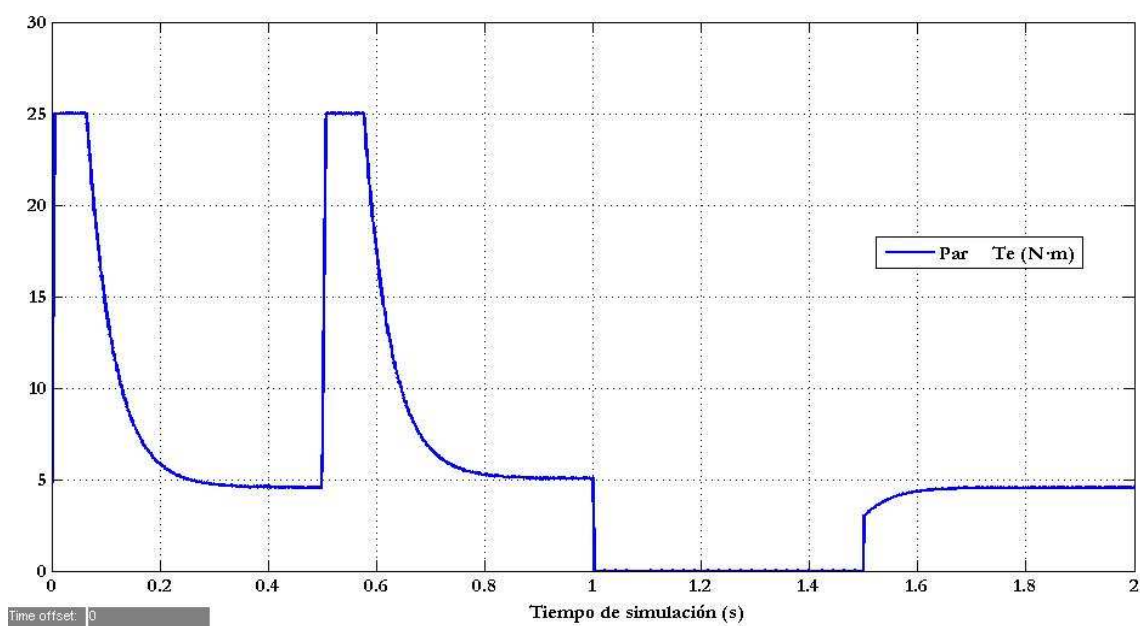
Así en este primer caso llevado a cabo en esta simulación se puede apreciar una regulación de la velocidad angular entorno a los valores 50, 100 y 30 rad/s , además del límite de las señales de intensidad de la armadura y par.



Gráfica 5.19. Velocidad angular en función del tiempo se simulación. Simulación 6.



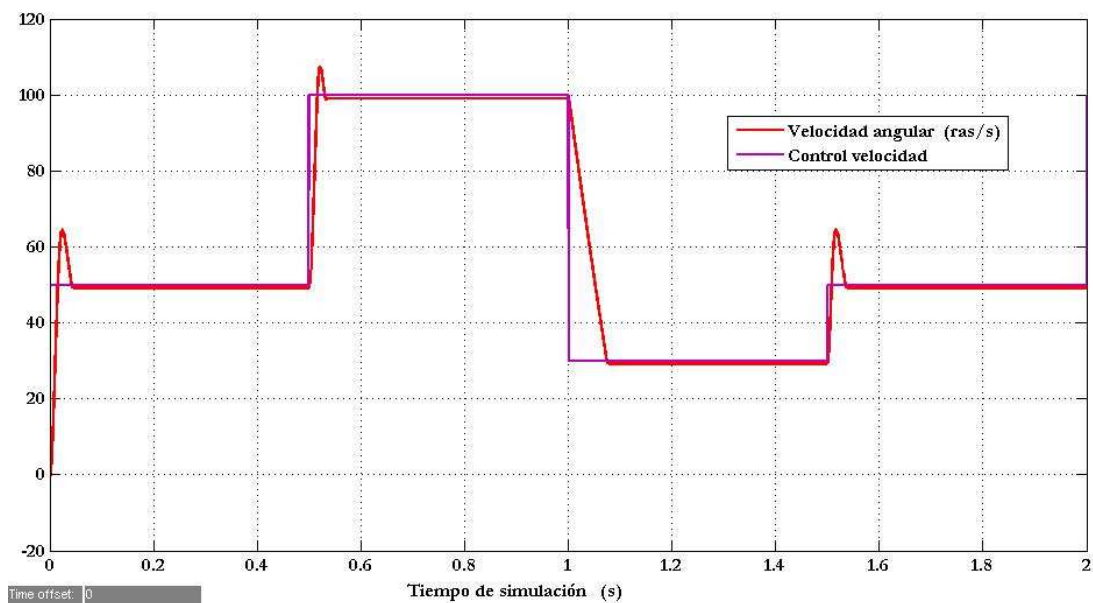
Gráfica 5.20. Intensidad de la armadura en función del tiempo de simulación. Simulación 6.



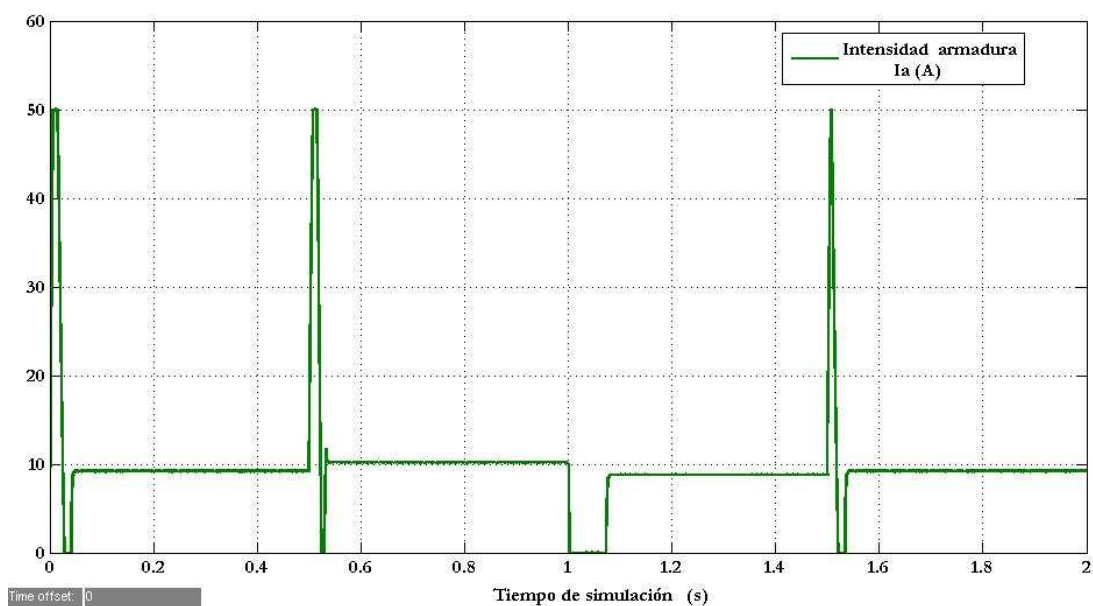
Gráfica 5.21. Par electromagnético en función del tiempo de simulación. Simulación 6.

5.6.2 Segundo caso ($G = 10$ y $J = 0,005$).

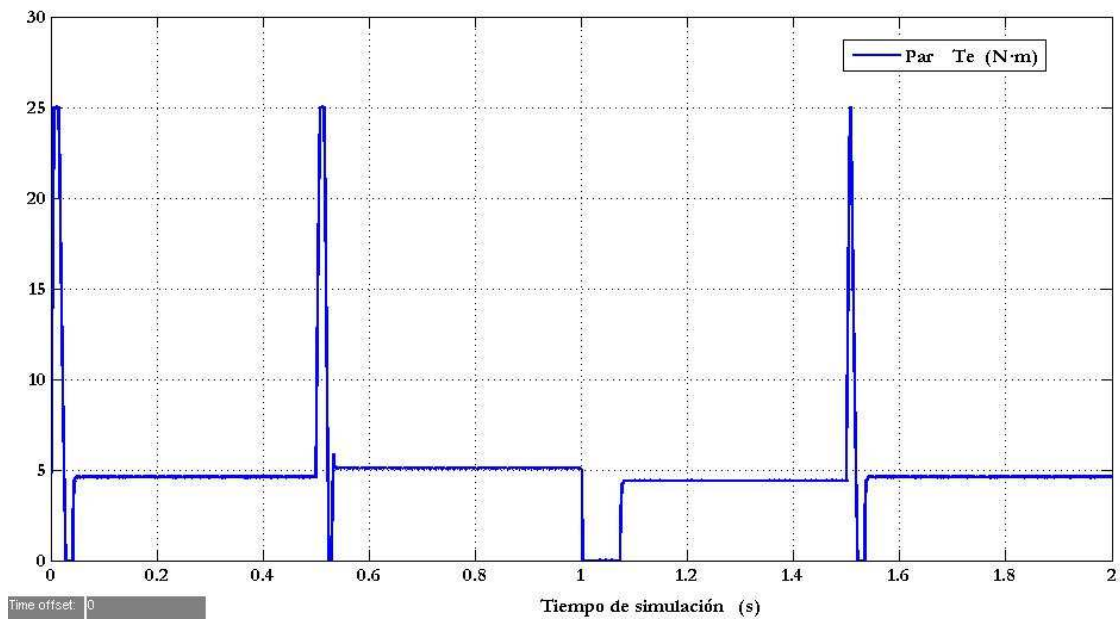
En este caso al igual que en el segundo caso de la quinta simulación, se vuelven a variar los parámetros ganancia del bloque de regulación de velocidad y momento de inercia del motor.



Gráfica 5.22. Velocidad angular en función del tiempo de simulación. Simulación 6.



Gráfica 5.23. Intensidad de la armadura en función del tiempo de simulación. Simulación 6.



Grafica 5.24. Par electromagnético en función del tiempo de simulación. Simulación 6.

5.7 Séptima simulación.

Modelo discreto modificado de la sexta simulación introduciendo un controlador PID para el control de la velocidad angular.

El caso dado en esta séptima simulación consiste en incluir en el modelo presentado en la anterior simulación, un controlador PID que corrija la señal de salida de la velocidad reduciendo el error estático y consiguiendo estabilidad en las señales de salida.

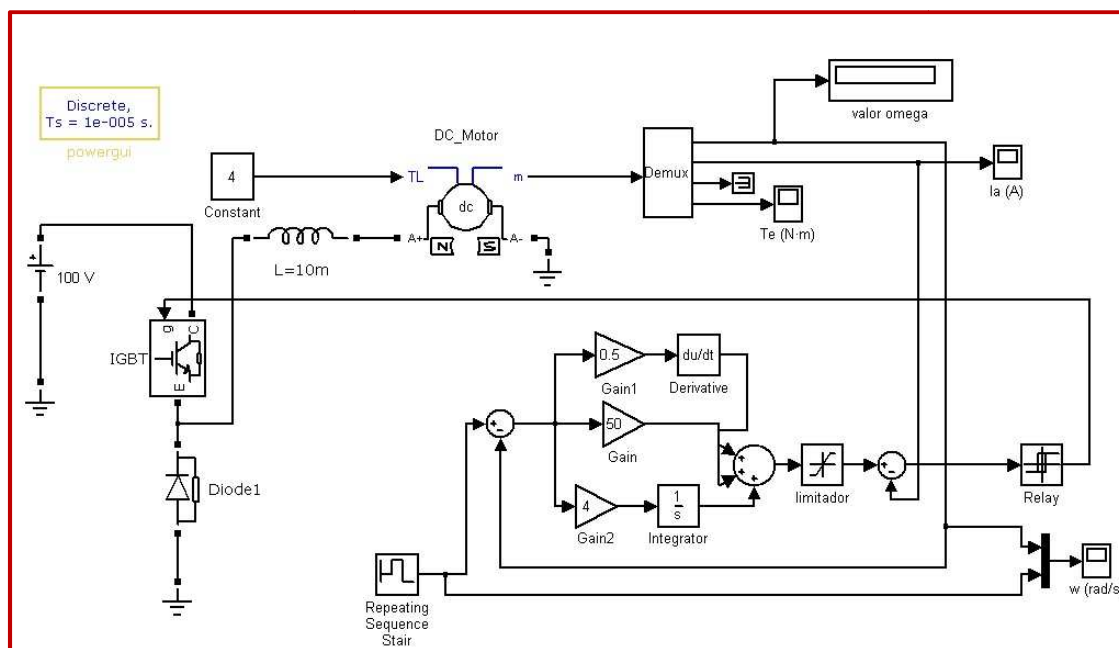


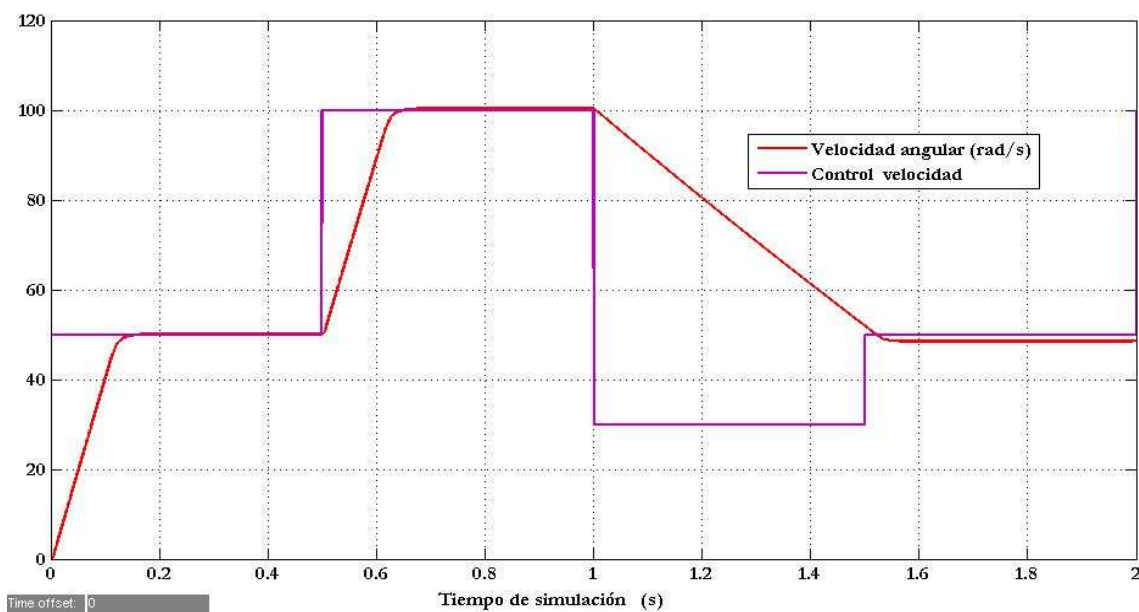
Figura 5.16. Esquema del modelo del motor de continua de la simulación 7 con Matlab- Simulink.

A continuación se presentan los resultados obtenidos con la simulación de cuatro casos, los cuales corresponden a un controlador PID para dos valores de momento de inercia (0,05 y 0,005), y un controlador proporcional para ambos valores de momentos de inercia.

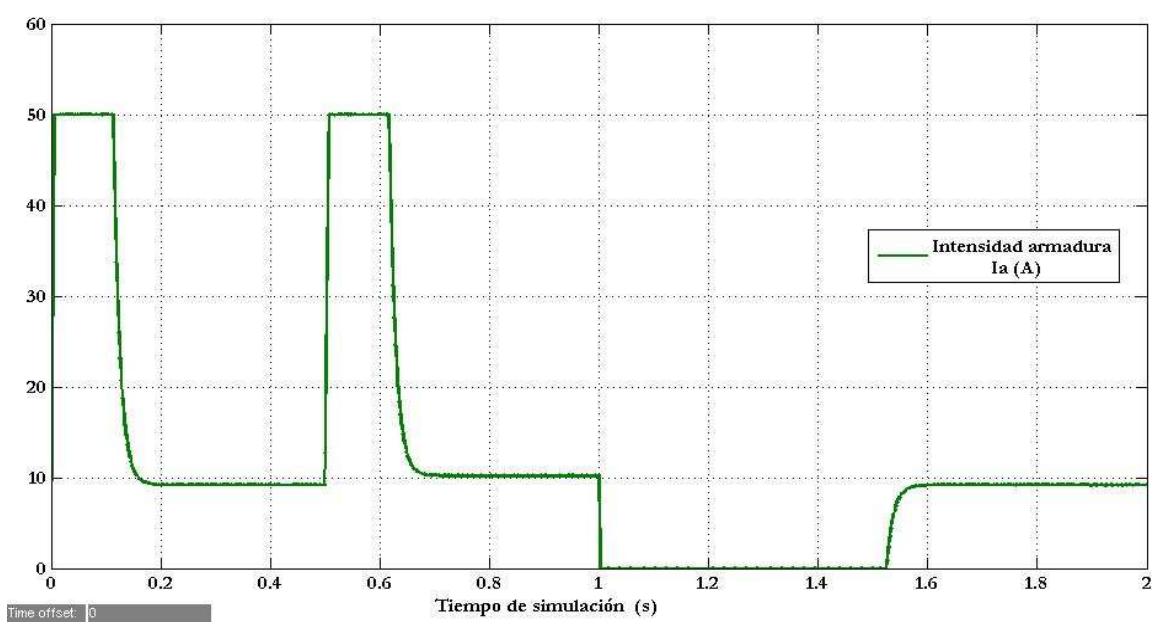
5.7.1 Primer caso ($J = 0,05, G_p = 50, G_i = 4, G_d = 0,6$).

Este caso supone una modificación del esquema de la anterior simulación. En este modelo se realiza el control de la señal velocidad, mediante un controlador PID con unos valores de coeficientes de proporcionalidad, derivativo e integral óptimos para conseguir la estabilidad de las señales de salida y para anular el error estático.

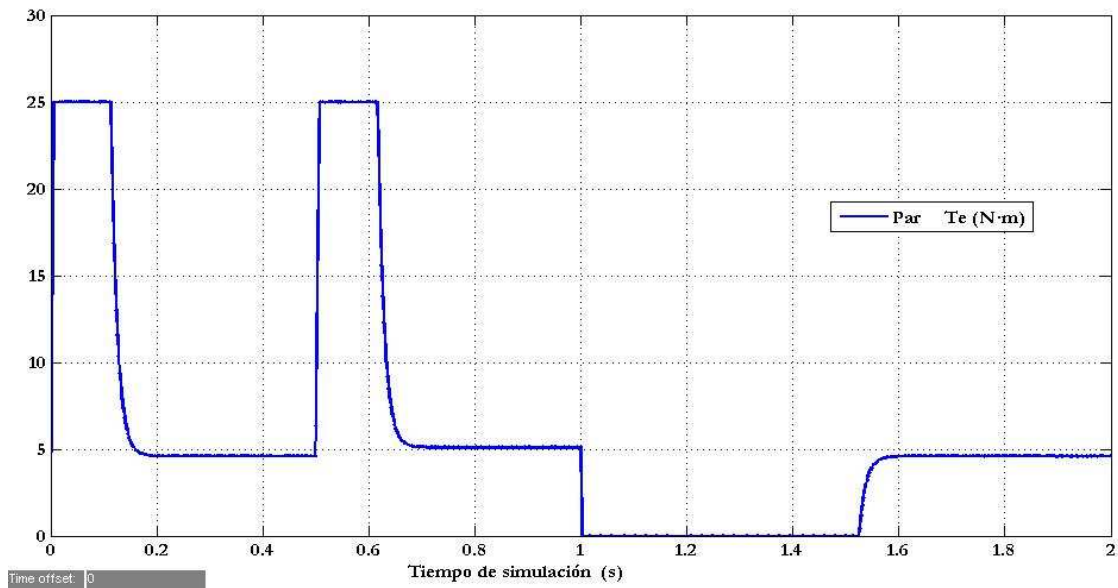
Esta simulación tiene el objetivo de la anterior, es decir, regular la señal velocidad y limitar los valores máximos de intensidad de la armadura y par, pero alcanzando unas señales de salida más estables y libres de presentar error estático.



Gráfica 5.25. Velocidad angular en función del tiempo de simulación. Simulación 7.



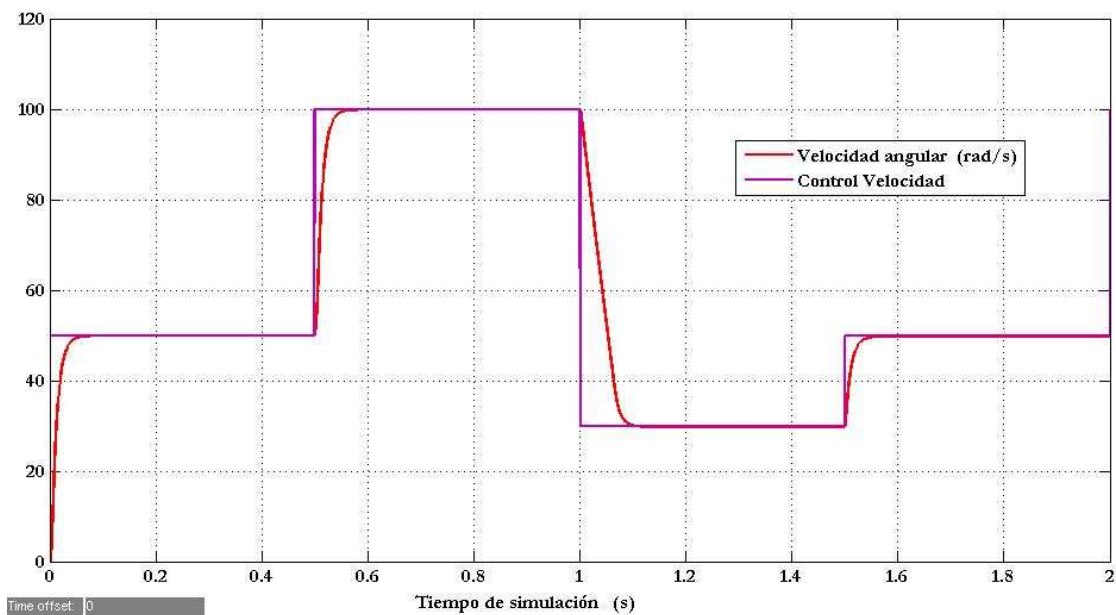
Gráfica 5.26. Intensidad de la armadura en función del tiempo de simulación. Simulación 7.



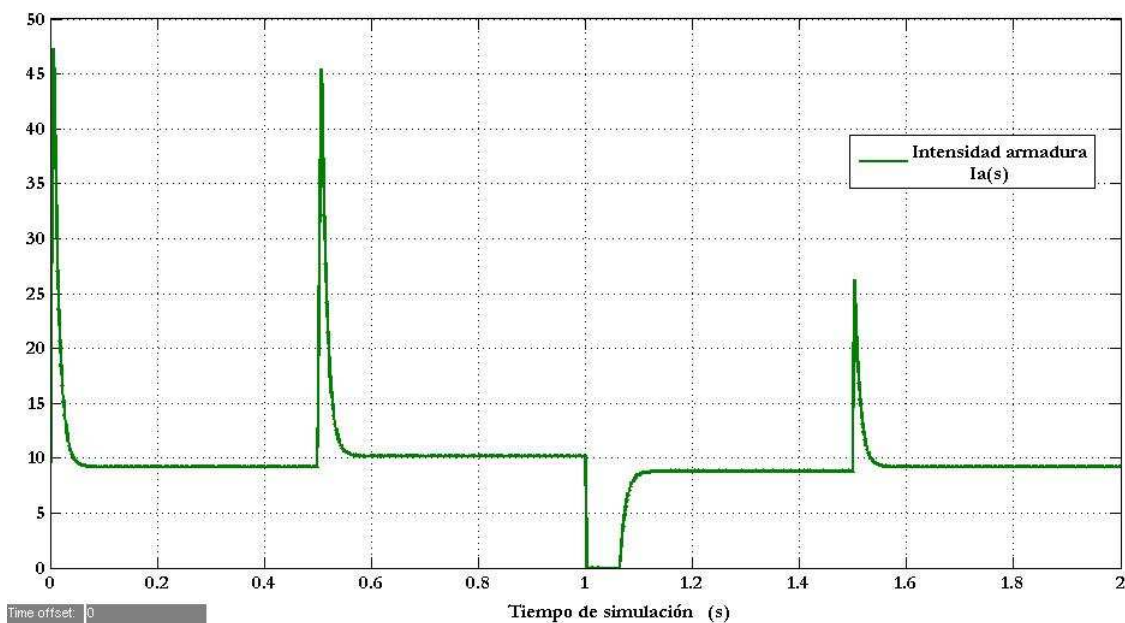
Gráfica 5.27. Par electromagnético en función del tiempo de simulación. Simulación 7.

5.7.2 Segundo caso ($J=0,005$, $G_p=50$, $G_i=4$, $G_d=0,6$).

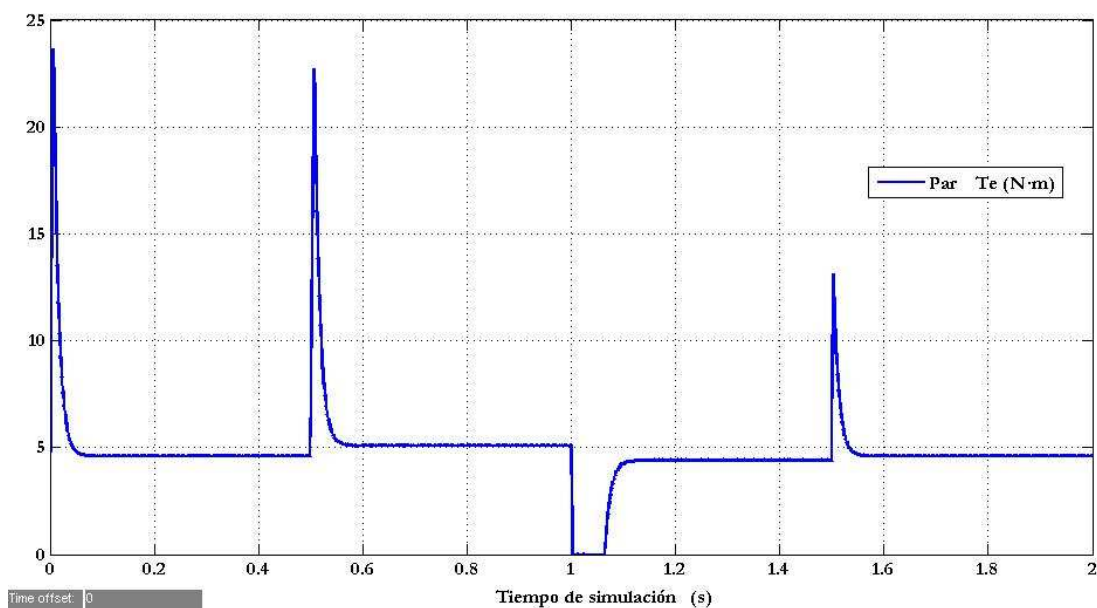
Este caso presenta una pequeña modificación con respecto al caso anterior. Simplemente se trata de un motor al que se le aplica un control de la señal velocidad mediante un controlador PID, pero con la particularidad de tener un momento de inercia menor (en este caso $0,005$).



Gráfica 5.28. Velocidad angular en función del tiempo de simulación. Simulación 7.



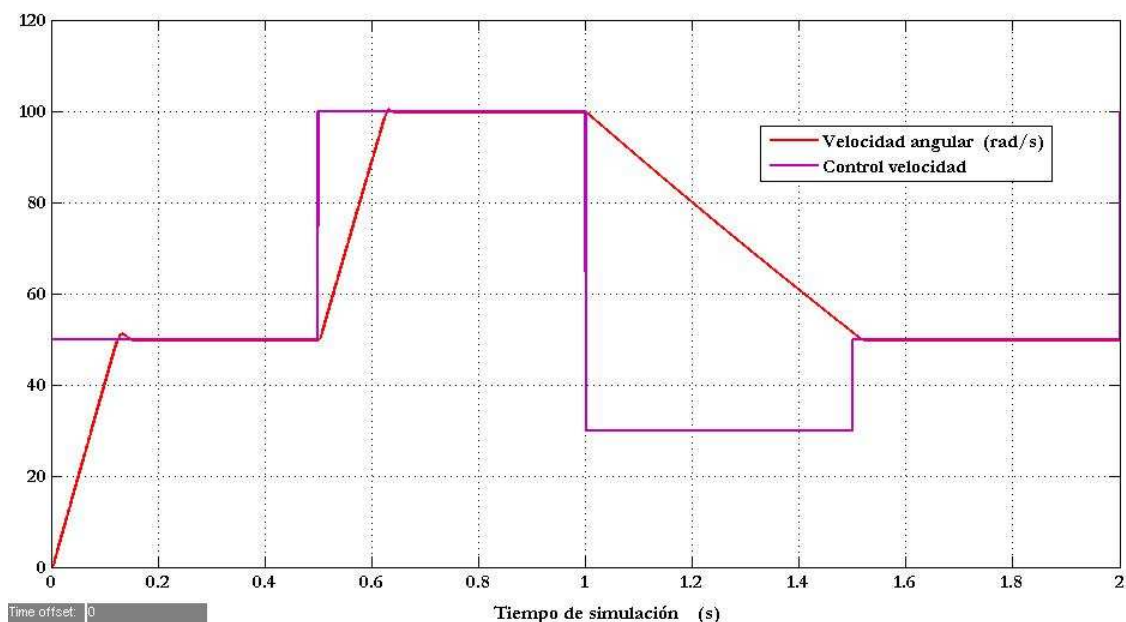
Gráfica 5.29. Intensidad de la armadura en función del tiempo de simulación. Simulación 7.



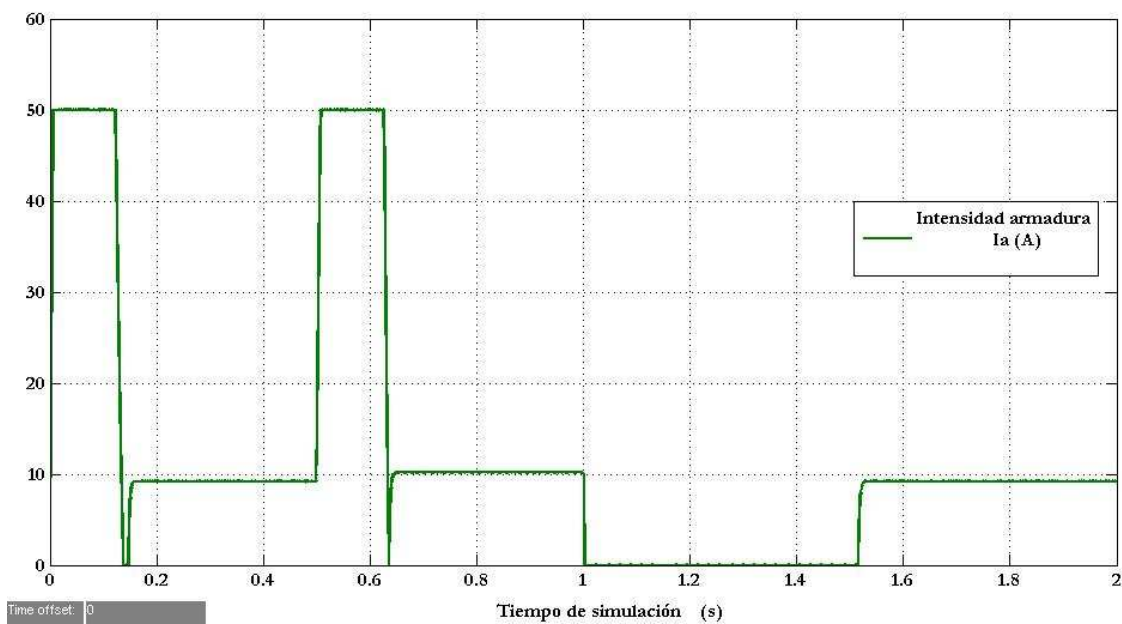
Gráfica 5.30. Par electromagnético en función del tiempo de simulación. Simulación 7.

5.7.3 Tercer caso ($J = 0,05, Gp = 50, Gi = 0, Gd = 0$).

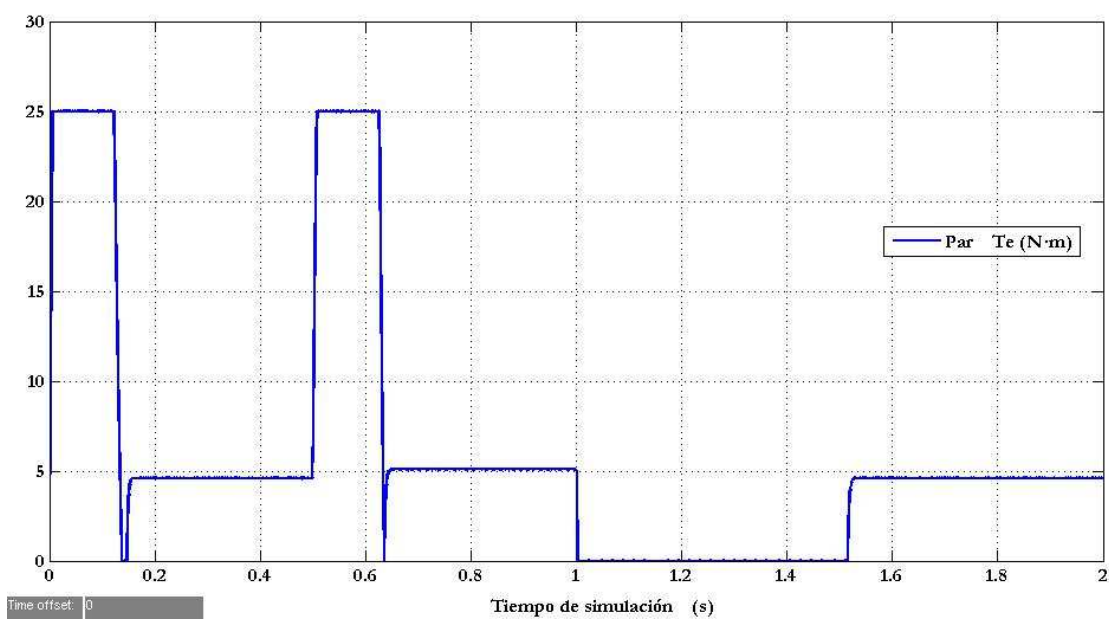
En este tercer caso, se aplica el control de la velocidad angular mediante un controlador proporcional para un momento de inercia de 0,05.



Gráfica 5.31. Velocidad angular en función del tiempo de simulación. Simulación 7.



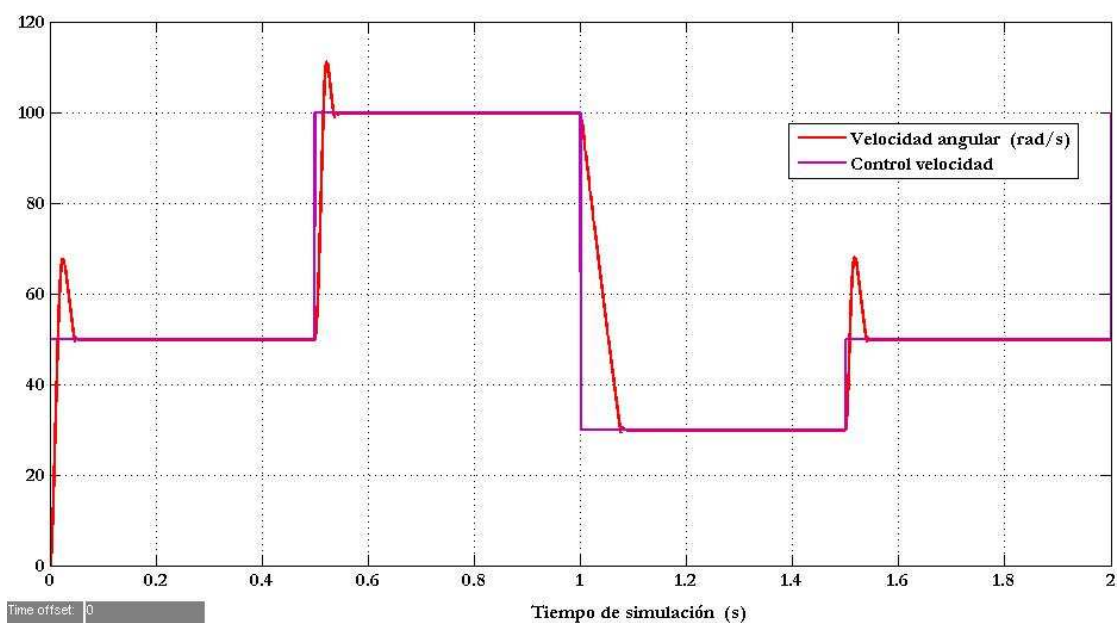
Gráfica 5.32. Intensidad de la armadura en función del tiempo de simulación. Simulación 7.



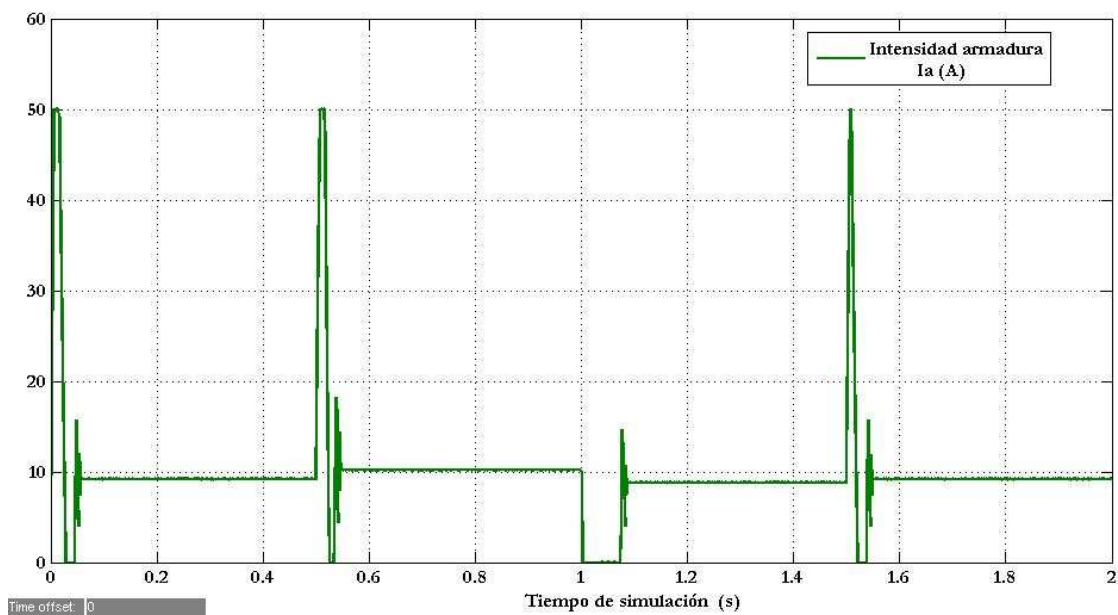
Gráfica 5.33. Par electromagnético en función del tiempo de simulación. Simulación 7.

5.7.4 Cuarto caso ($J = 0,005, Gp = 50, Gi = 0, Gd = 0$).

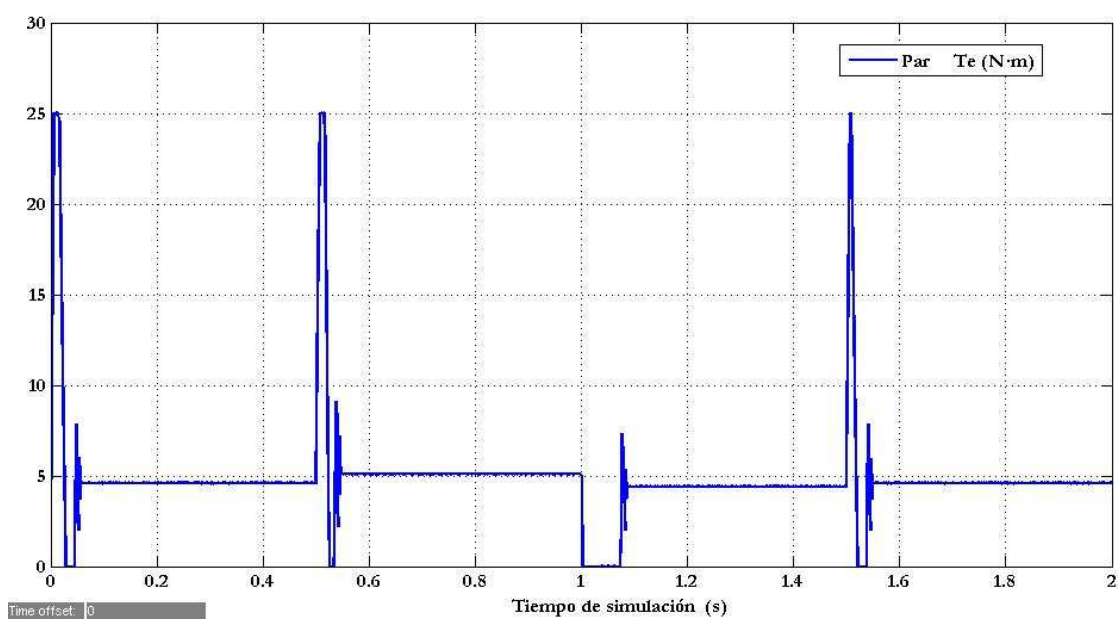
Este caso supone con respecto al anterior, únicamente la modificación del valor del momento de inercia en un valor menor (0,005). El control de la señal velocidad se lleva a cabo mediante un controlador proporcional con el mismo coeficiente de proporcionalidad empleado en los casos llevados a cabo en esta séptima simulación.



Gráfica 5.34. Velocidad angular en función del tiempo de simulación. Simulación 7.



Gráfica 5.35. Intensidad de la armadura en función del tiempo de simulación. Simulación 7.



Gráfica 5.36. Par electromagnético en función del tiempo de simulación. Simulación 7.

5.8 Octava simulación.

Modelo discreto modificado de la cuarta simulación (motor del caso de estudio) introduciendo un controlador PID para el control de la velocidad angular (valor límite constante).

Una vez analizados los resultados obtenidos para cada uno de los casos de la séptima simulación, se llega a la conclusión de que para aumentar la estabilidad de las señales de salida y eliminar el error estático hay que aplicar un controlador PID, con unos valores de coeficientes proporcional, derivativo e integral óptimos para cada caso de estudio.

En esta octava simulación, se va a incluir al esquema de la cuarta simulación (motor de características semejantes al caso de estudio) la regulación de la velocidad y límite de la intensidad, mediante un controlador PID, de modo que los coeficientes proporcional, derivativo e integral tengan unos valores que garanticen la estabilidad de las señales de salida y la eliminación del error estático.

Los valores de los coeficientes del controlador son los dados en la bibliografía consultada y tomados para el caso de estudio. Estos valores son los dados en la Tabla 3.1 ($G_d = 2, G_p = 150, G_i = 5$).

El caso llevado a cabo en esta simulación corresponde al control total PID de la variable velocidad angular con respecto a una señal de referencia escalón para el caso de estudio de este proyecto.

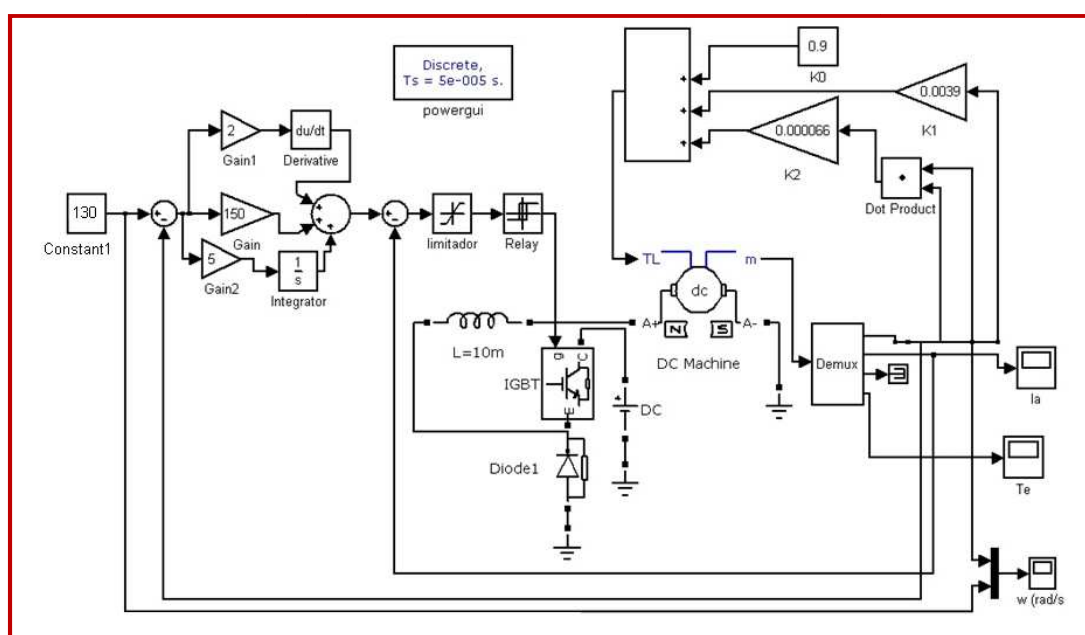
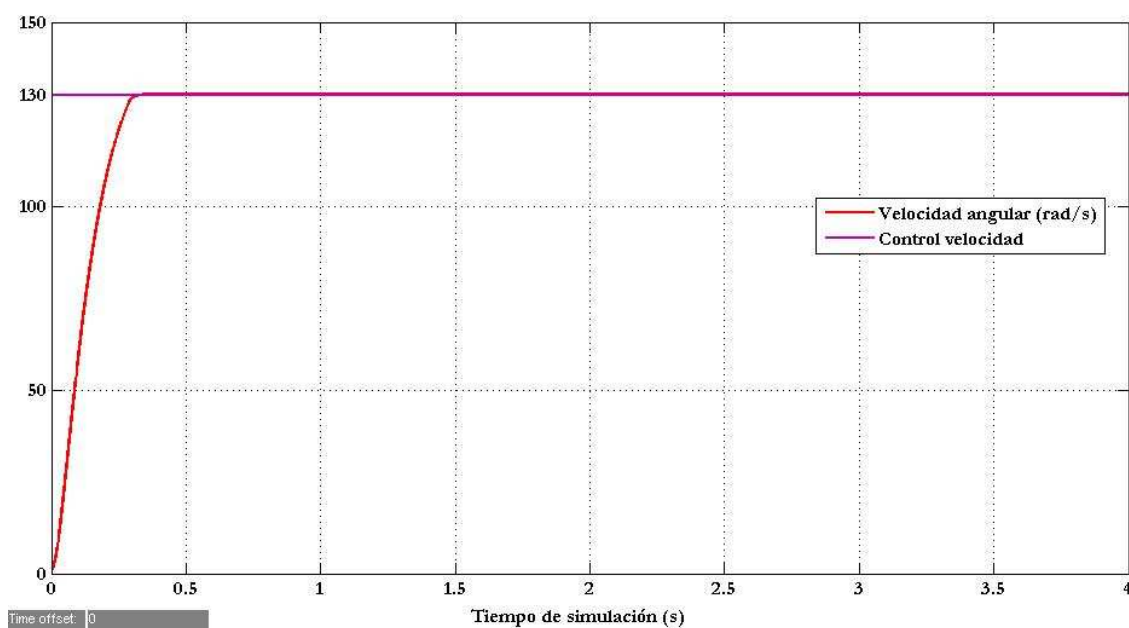
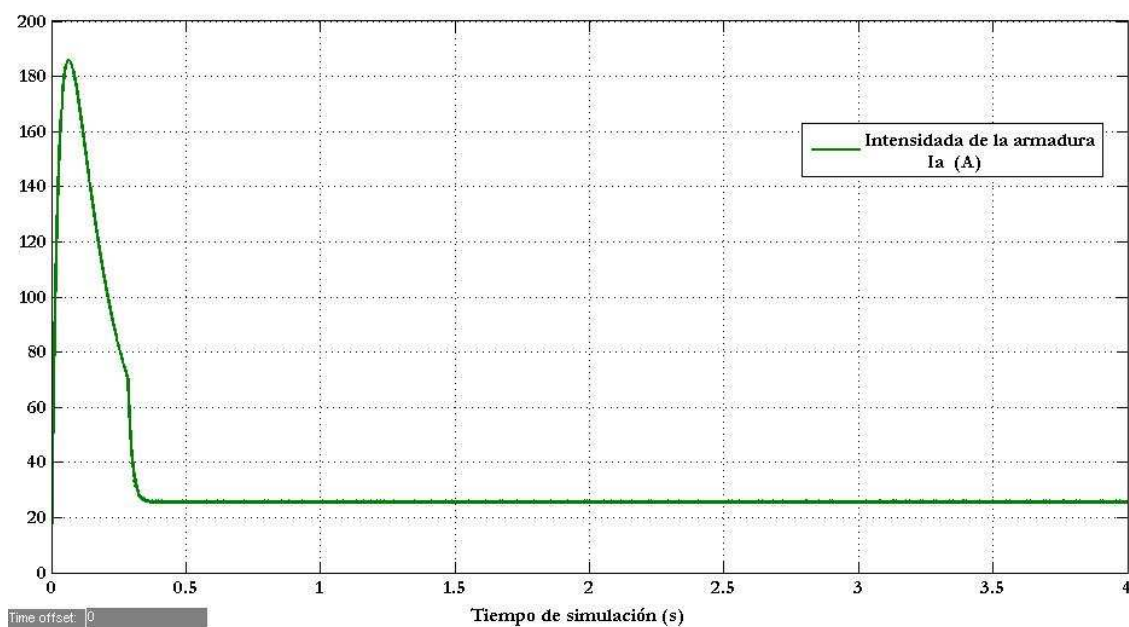


Figura 5.17. Esquema del modelo del motor de continua de la simulación 8 con Matlab- Simulink.

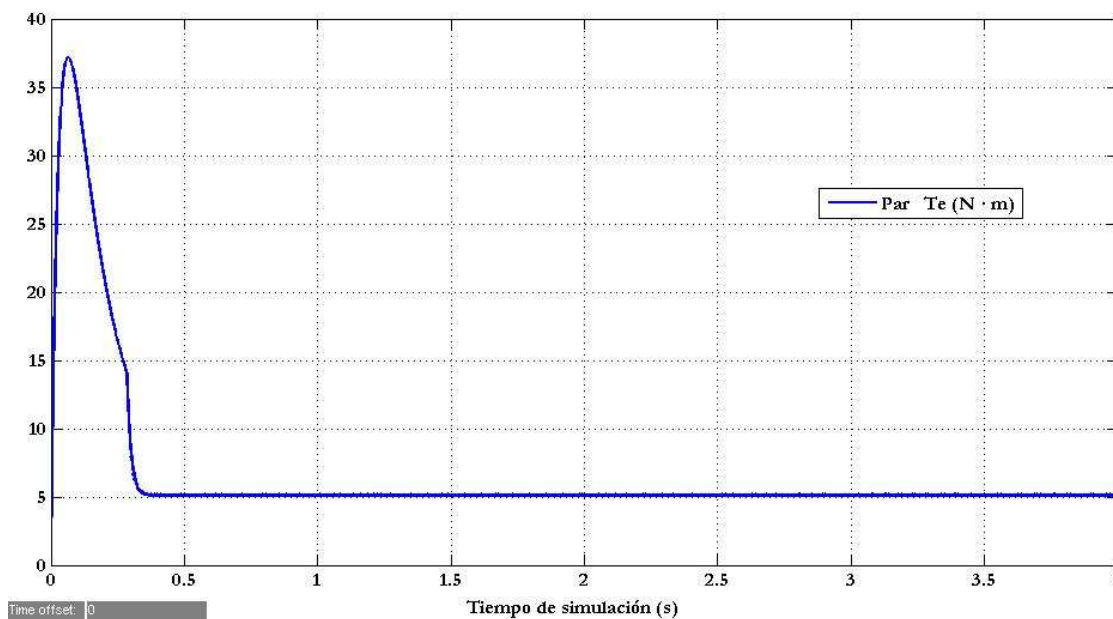
Los resultados de esta simulación se representan en las Gráficas 5.37, 5.38 y 5.39.



Gráfica 5.37. Velocidad angular en función del tiempo de simulación. Simulación 8.



Gráfica 5.38. Intensidad de la armadura en función del tiempo de simulación. Simulación 8.



Gráfica 5.39. Par electromagnético en función del tiempo de simulación. Simulación 8.

5.9 Novena simulación.

Estimación de los errores velocidad, intensidad, y cálculo del error total aplicado al controlador PID para el caso de estudio de este proyecto.

En esta simulación se van a calcular los errores de las señales velocidad angular e intensidad siguiendo el ejemplo planteado en los artículos de la bibliografía consultada ‘*An Efficient Tri-Loop Controller for Photovoltaic Powered Four-Wheel Electric Vehicle*’ y ‘*A Hybrid Photovoltaic PV Array-Battery Powered EV-PMDC Drive Scheme*’. Las señales del error velocidad, error intensidad y error total se obtienen como resultado de la simulación junto a las señales de salida de velocidad angular, intensidad de la armadura y par.

Se pretende obtener una señal de error total con unos valores próximos a cero.

Esta simulación será el paso previo a incluir en el bloque de control el cálculo del error de potencia presentado en la décima simulación.

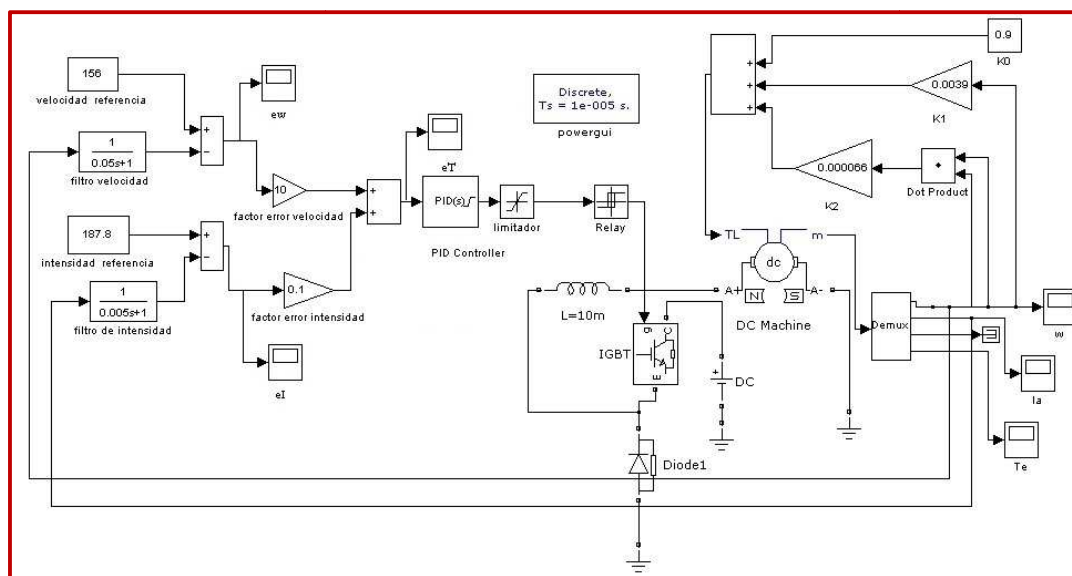
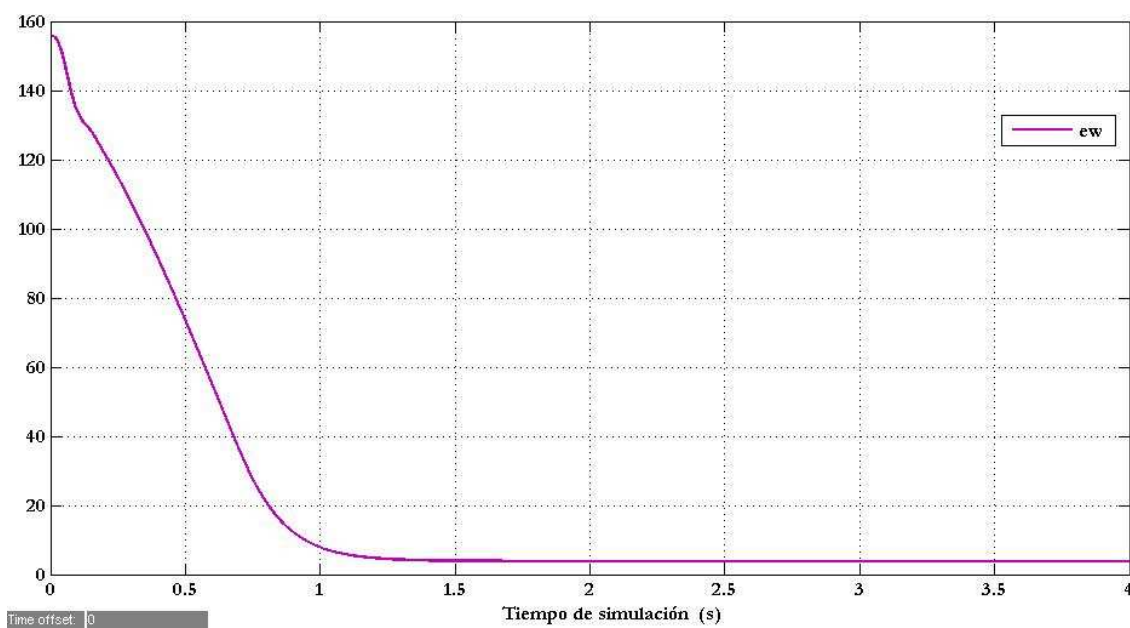


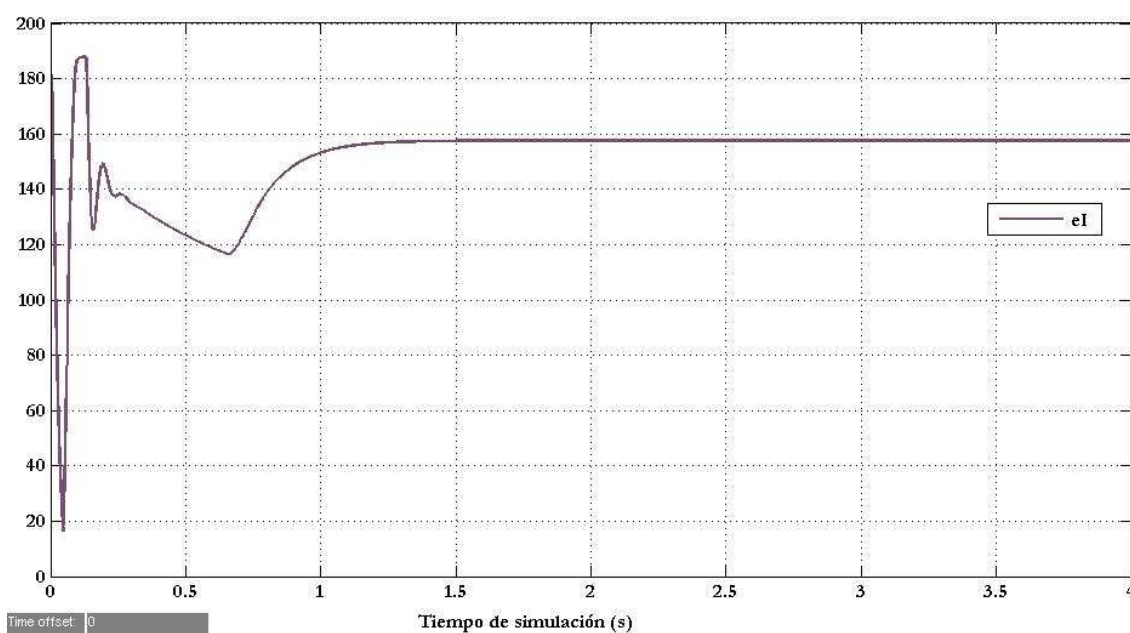
Figura 5.18. Esquema del modelo del motor de continua de la simulación 9 con Matlab- Simulink.

5.9.1 Señales error obtenidas de la simulación.

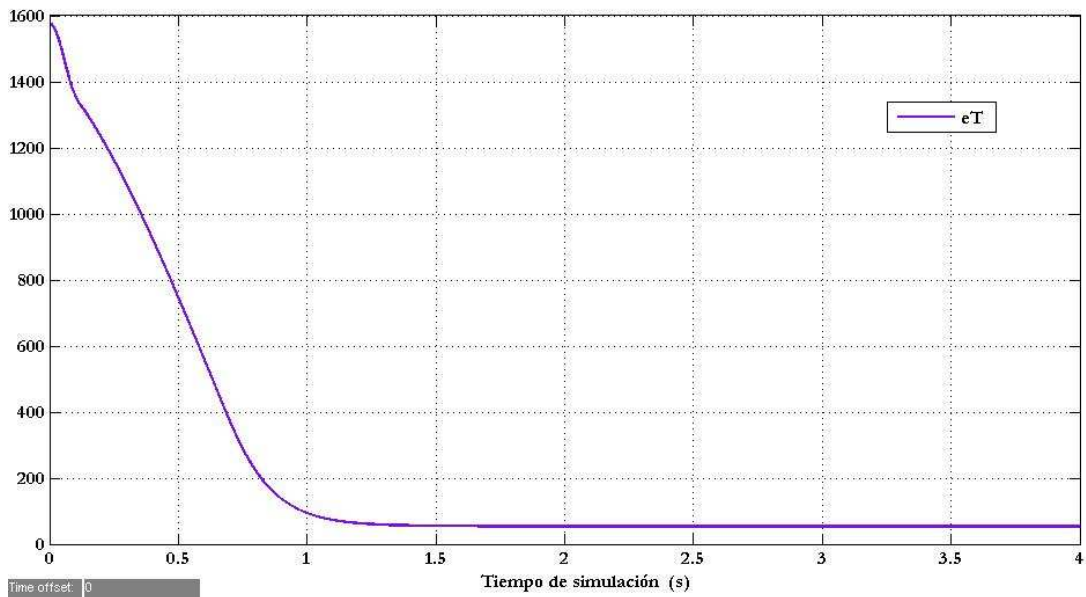
Los errores velocidad e intensidad multiplicados por el factor de ponderación correspondiente, dan como resultado el error total. Como se puede observar en las Gráficas 5.40, 5.41 y 5.42, las señales error tienden a disminuir a lo largo de la simulación, de forma que la señal de error total tiende a valores muy pequeños cercanos a cero.



Gráfica 5.40. Señal error de velocidad en función del tiempo de simulación. Simulación 9.



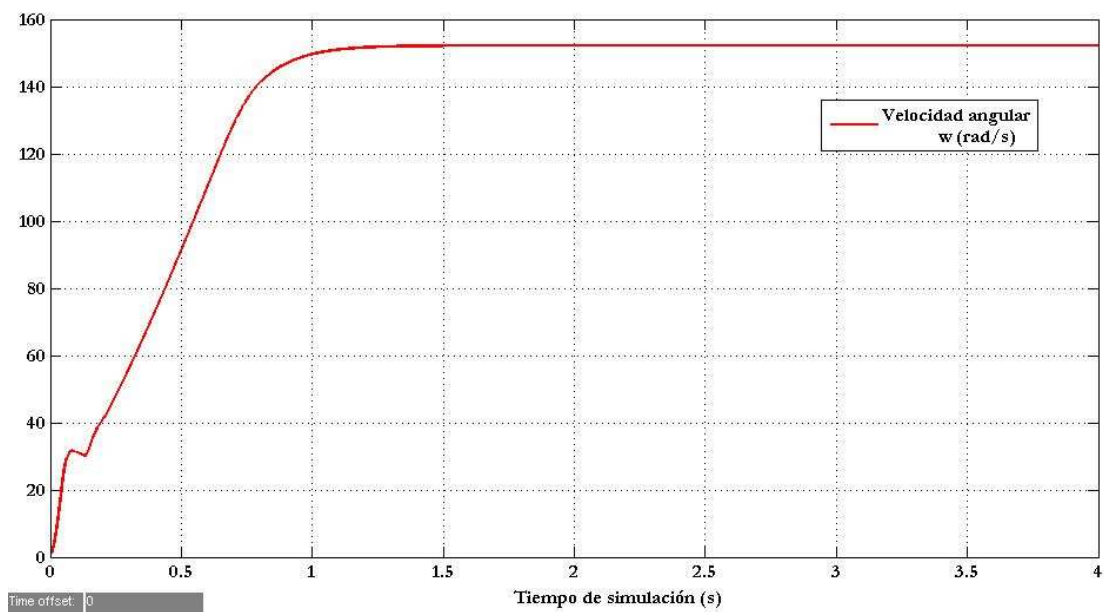
Gráfica 5.41. Señal error de intensidad en función del tiempo de simulación. Simulación 9.



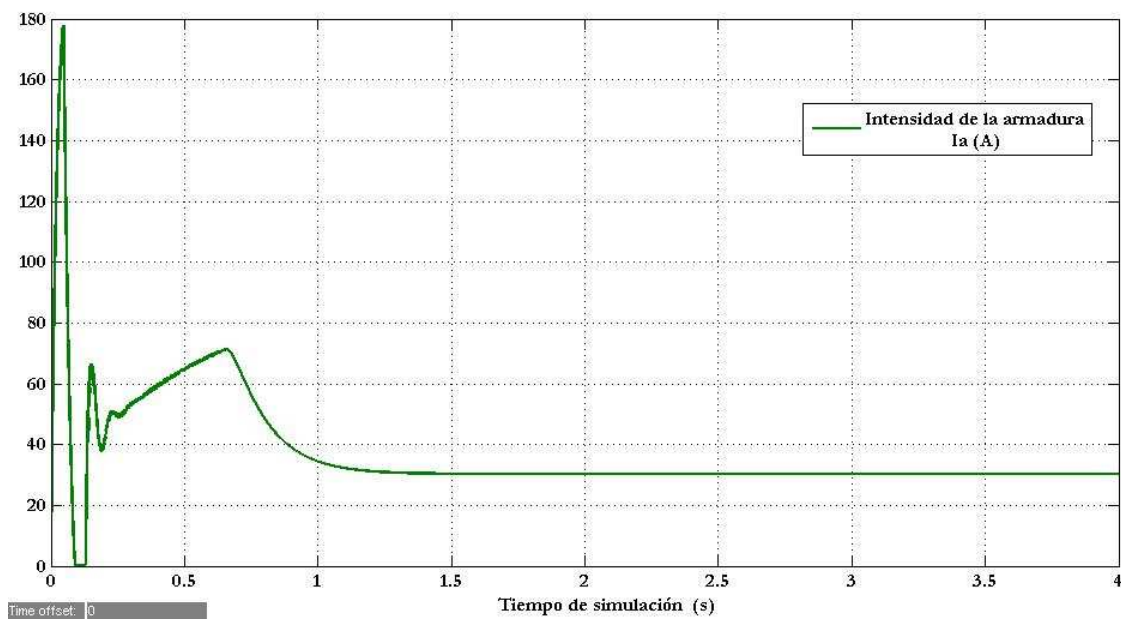
Gráfica 5.42. Señal error total en función del tiempo de simulación. Simulación 9.

5.9.2 Señales de salida velocidad, intensidad de la armadura y par obtenidas de la simulación.

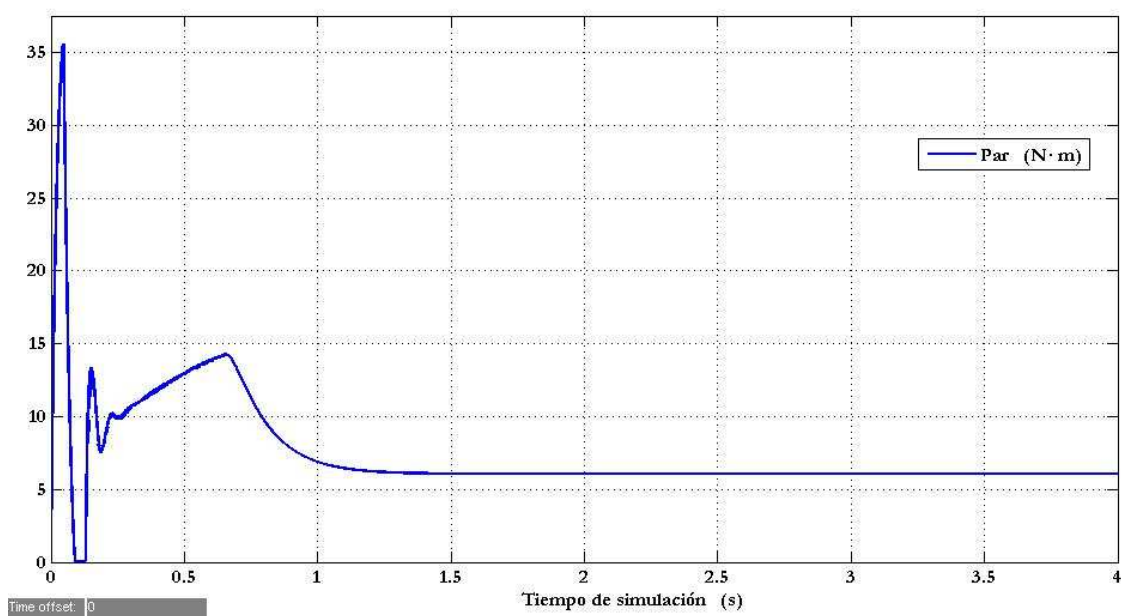
Las señales de salida de velocidad, intensidad de la armadura y par que se han obtenido en esta simulación, aparecen en las Gráficas 5.43, 5.44 y 5.45.



Gráfica 5.43. Velocidad angular en función del tiempo de simulación. Simulación 9.



Gráfica 5.44. Intensidad de la armadura en función del tiempo de simulación. Simulación 9.



Gráfica 5.45. Par electromagnético en función del tiempo de simulación. Simulación 9.

5.10 Décima simulación.

Estimación de los errores velocidad, intensidad y potencia, y aplicación del error total al controlador PID para el caso de estudio de este proyecto.

En esta simulación se van a calcular los errores de las señales velocidad angular, intensidad y potencia siguiendo el ejemplo planteado en los artículos de la bibliografía consultada citados en la simulación anterior. Las señales del error velocidad, error intensidad, error potencia y error total se obtienen como resultado de la simulación junto a las señales de salida de velocidad angular, intensidad de la armadura y par.

El error total se obtiene con la suma de los productos de los errores parciales de velocidad, intensidad y potencia por unos coeficientes de ponderación.

Se pretende obtener una señal de error total con unos valores próximos a cero.

Los valores de los coeficientes de ponderación, coeficientes proporcional, integral y derivativo, junto con la explicación detallada del esquema de control de la Figura 5.19, se dan en el apartado 4.2 de este proyecto.

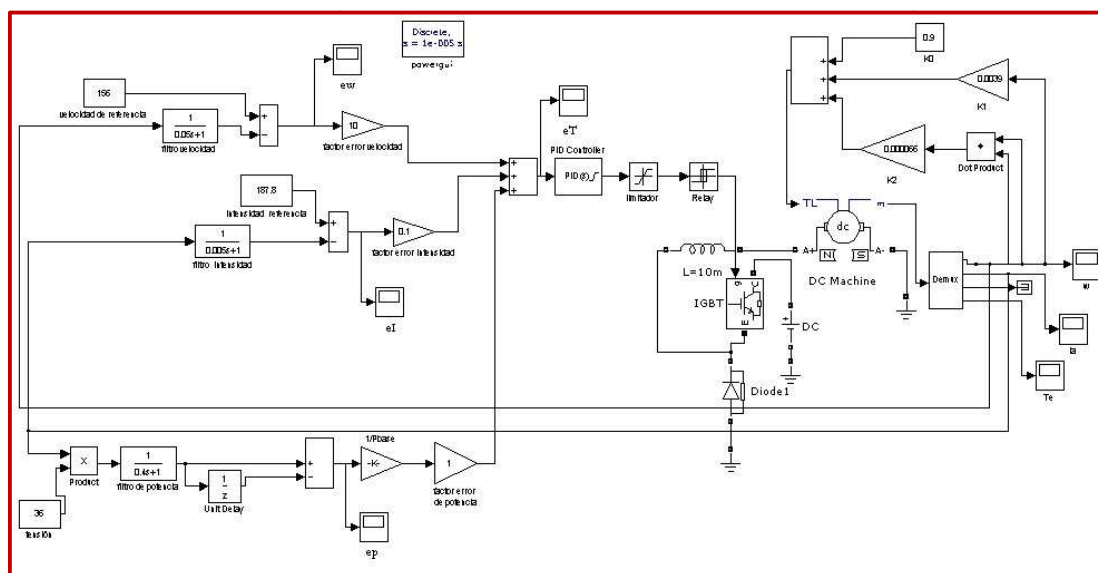
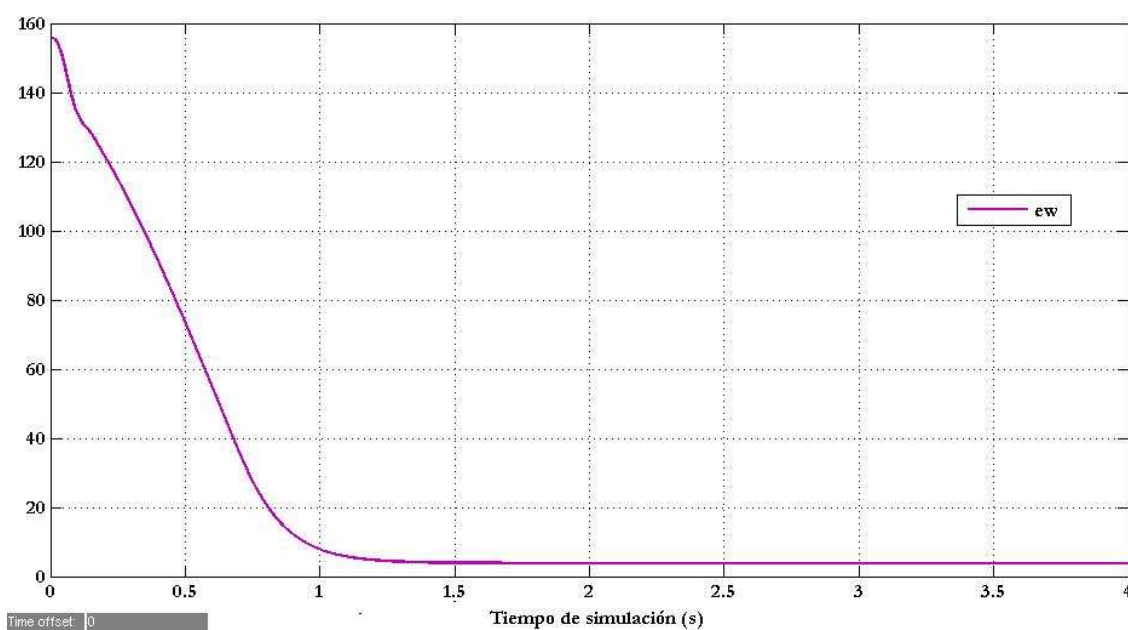


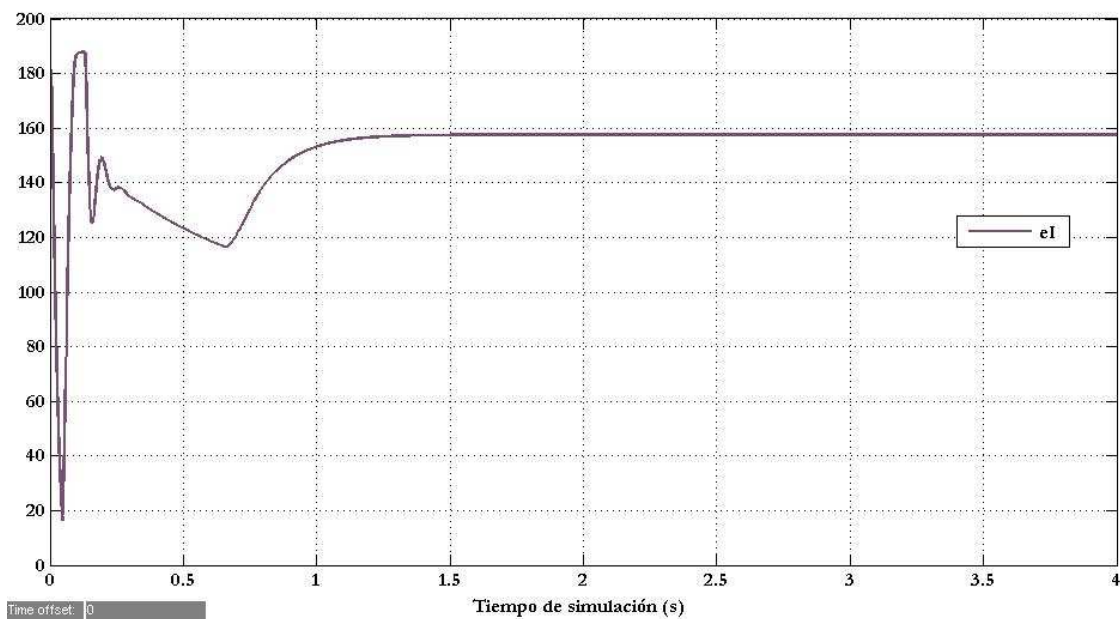
Figura 5.19. Esquema del modelo del motor de continua de la simulación 10 con Matlab- Simulink.

5.10.1 Señales error obtenidas de la simulación.

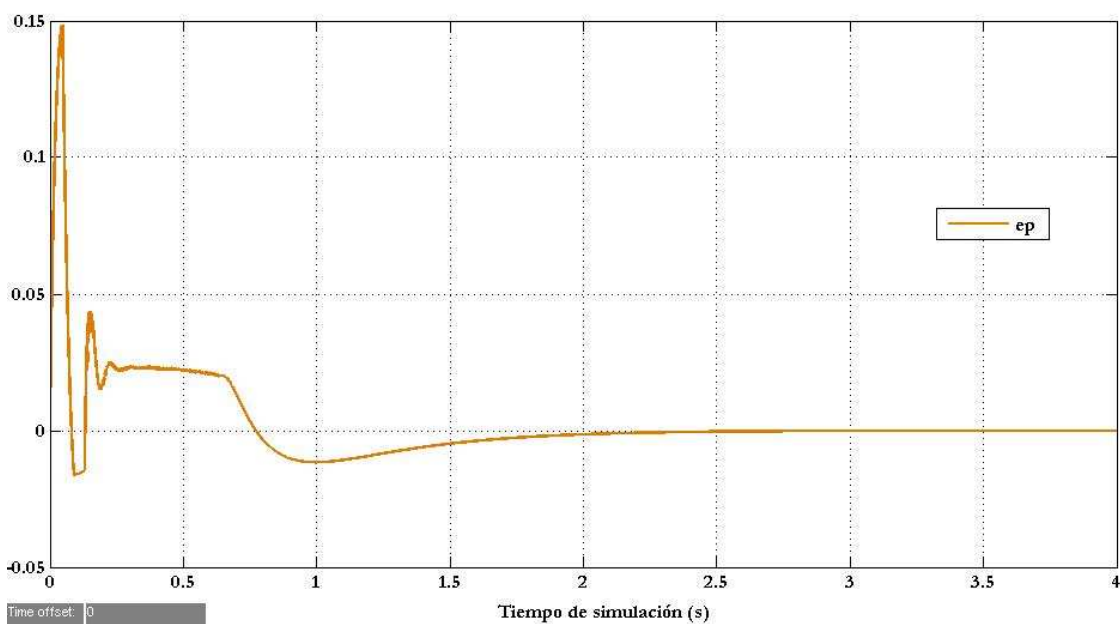
Los errores velocidad e intensidad multiplicados por el factor de ponderación correspondiente, dan como resultado el error total. Como se puede observar en las Gráficas 5.46, 5.47 y 5.48, las señales error tienden a disminuir a lo largo de la simulación, de forma que la señal de error total tiende a valores muy pequeños cercanos a cero.



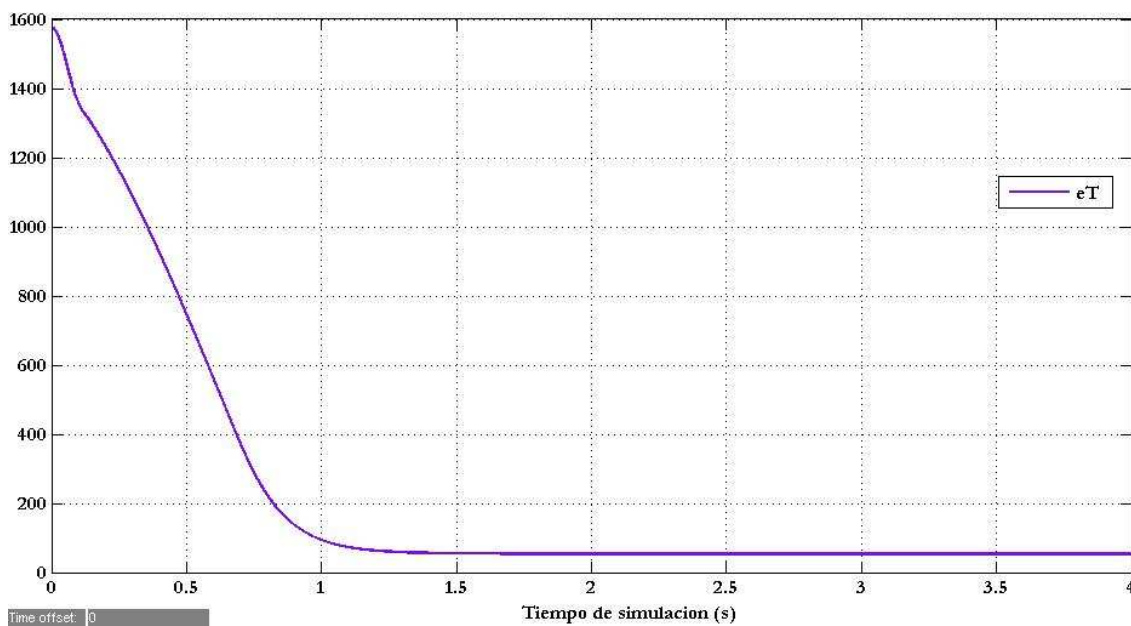
Gráfica 5.46. Señal error de velocidad en función del tiempo de simulación. Simulación 10.



Gráfica 5.47. Señal error de intensidad en función del tiempo de simulación. Simulación 10.



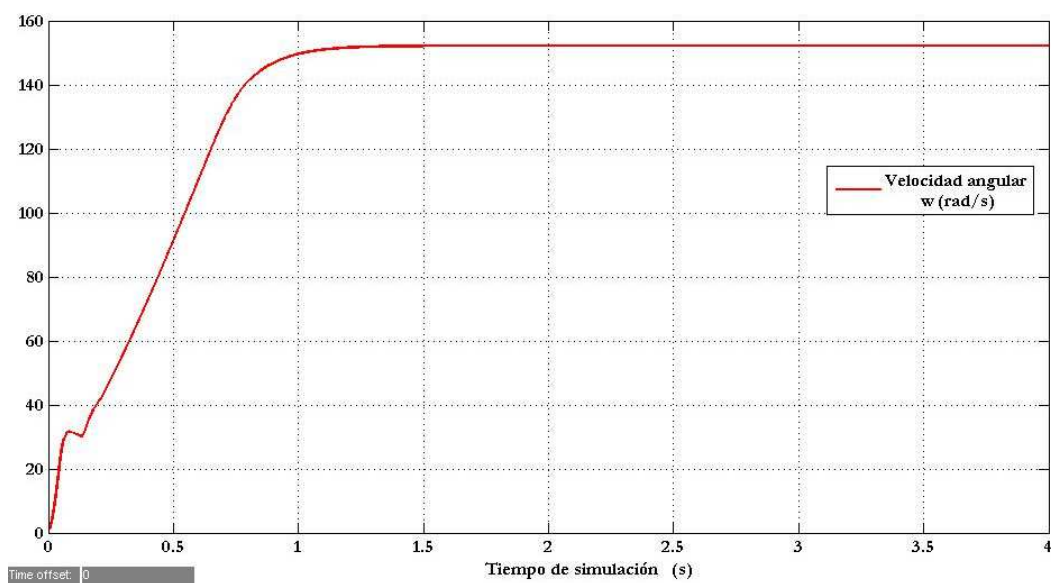
Gráfica 5.48. Señal error de potencia en función del tiempo de simulación. Simulación 10.



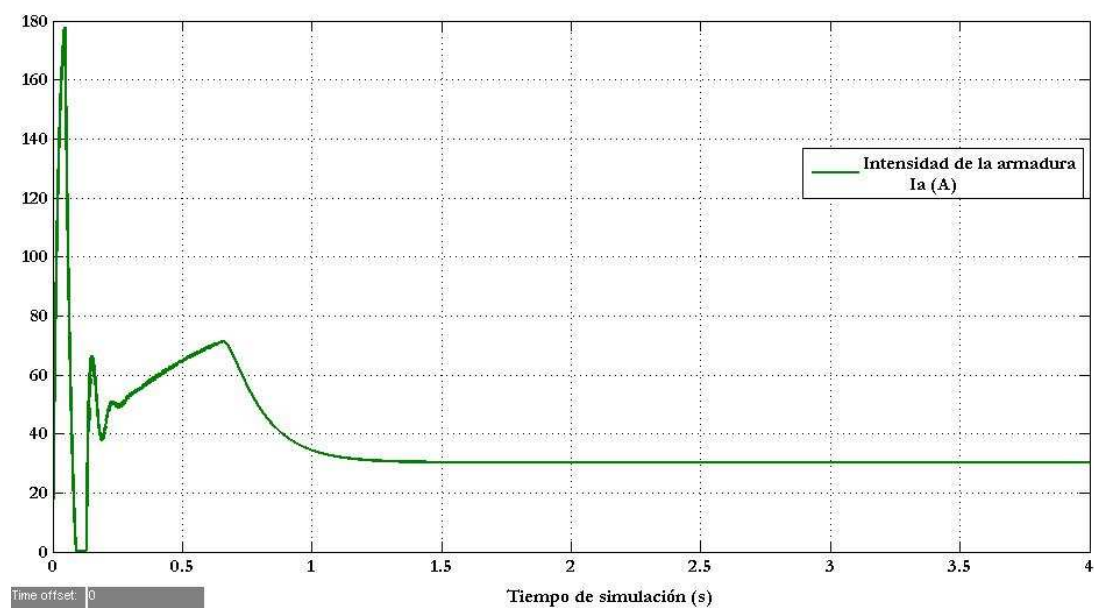
Gráfica 5.49. Señal error total en función del tiempo de simulación. Simulación 10.

5.10.2 Señales de salida velocidad, intensidad de la armadura y par obtenidas de la simulación.

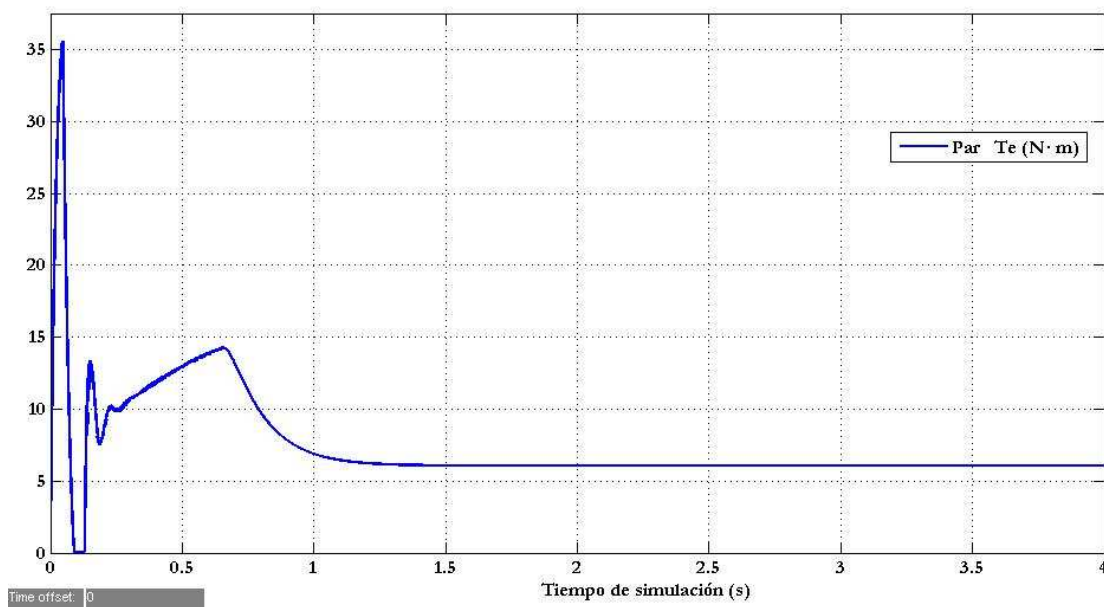
Las señales velocidad, intensidad de la armadura y par obtenidas en esta simulación aparecen en las Gráficas 5.50, 5.51 y 5.52.



Gráfica 5.50. Velocidad angular en función del tiempo de simulación. Simulación 10.



Gráfica 5.51. Intensidad de la armadura en función del tiempo de simulación. Simulación 10.



Gráfica 5.52. Par electromagnético en función del tiempo de simulación. Simulación 10.

5.11 Undécima simulación.

Estimación de los errores velocidad, intensidad, y cálculo del error total aplicado al controlador PID para el motor de estudio alimentado por un panel fotovoltaico.

En esta simulación se van a calcular los errores de las señales velocidad angular, intensidad y potencia siguiendo el ejemplo planteado en los artículos de la bibliografía consultada citados en la simulación anterior, incluyendo el modelo de panel fotovoltaico en el esquema final planteado en Matlab-Simulink. Las señales del error velocidad, error intensidad, error potencia y error total se obtienen como resultado de la simulación junto a las señales de salida de velocidad angular, intensidad de la armadura y par.

La diferencia fundamental con respecto al modelo desarrollado en la anterior simulación, radica en que en esta simulación se ha sustituido la fuente de tensión de 36 V por un modelo de panel fotovoltaico.

El error total se obtiene con la suma de los productos de los errores parciales de velocidad, intensidad y potencia por los coeficientes de ponderación dados en la anterior simulación.

La siguiente figura corresponde al esquema final del caso de estudio tratado en este proyecto. El esquema está formado básicamente por tres partes fundamentales. Una parte dedicada al control de la velocidad, intensidad y potencia. Otra parte esta constituida por el bloque motor. La última parte está constituida por la alimentación al motor, en este caso, por el primer modelo de panel fotovoltaico descrito en este proyecto.

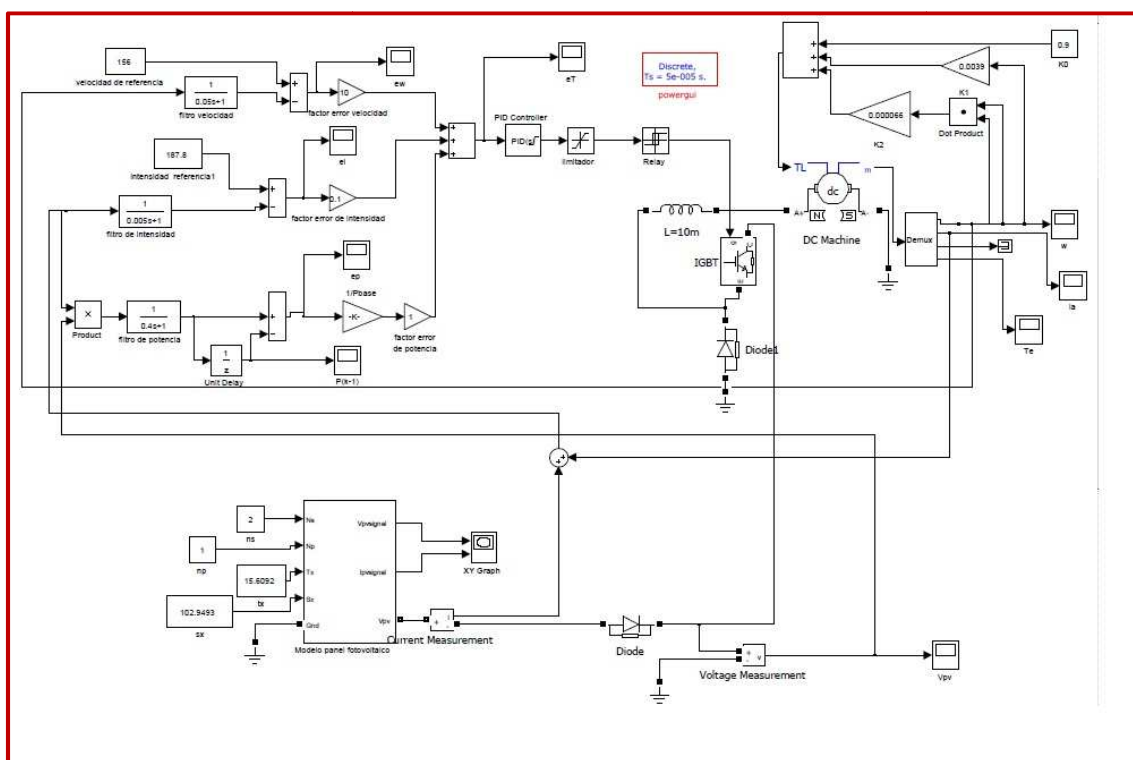
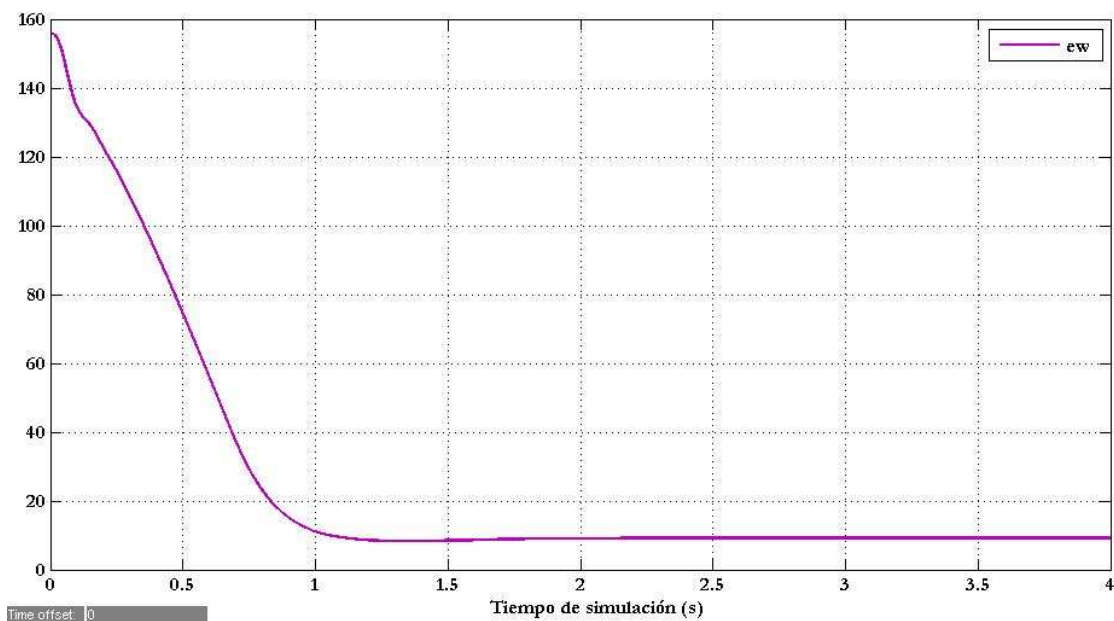


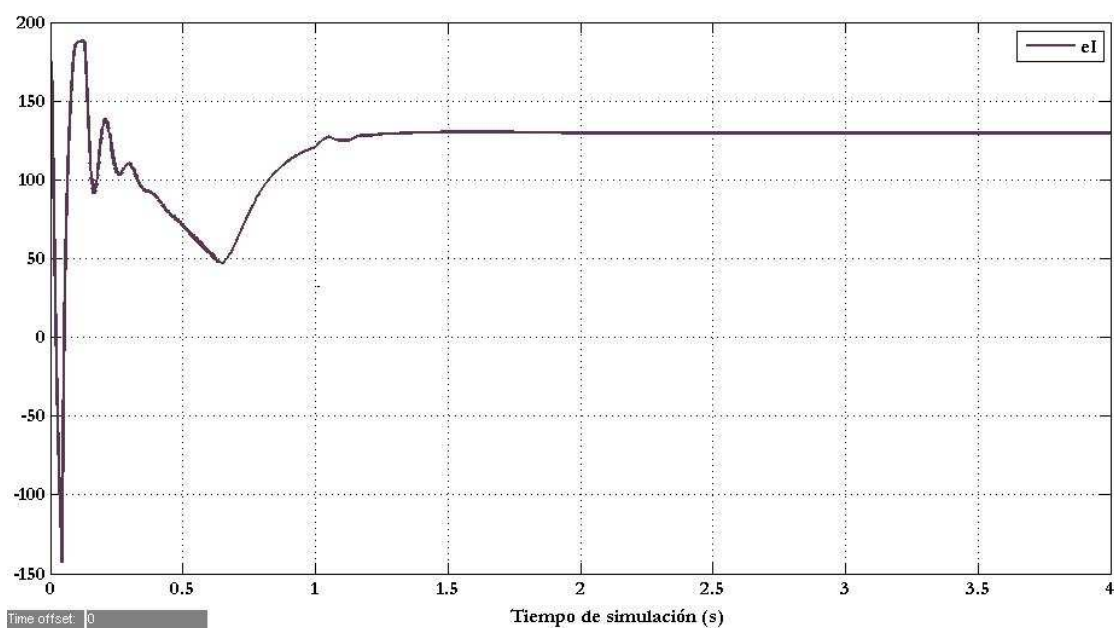
Figura 5.20. Esquema final del modelo del motor de continua de la simulación 11 desarrollado con Matlab- Simulink.

5.11.1 Señales error obtenidas de la simulación.

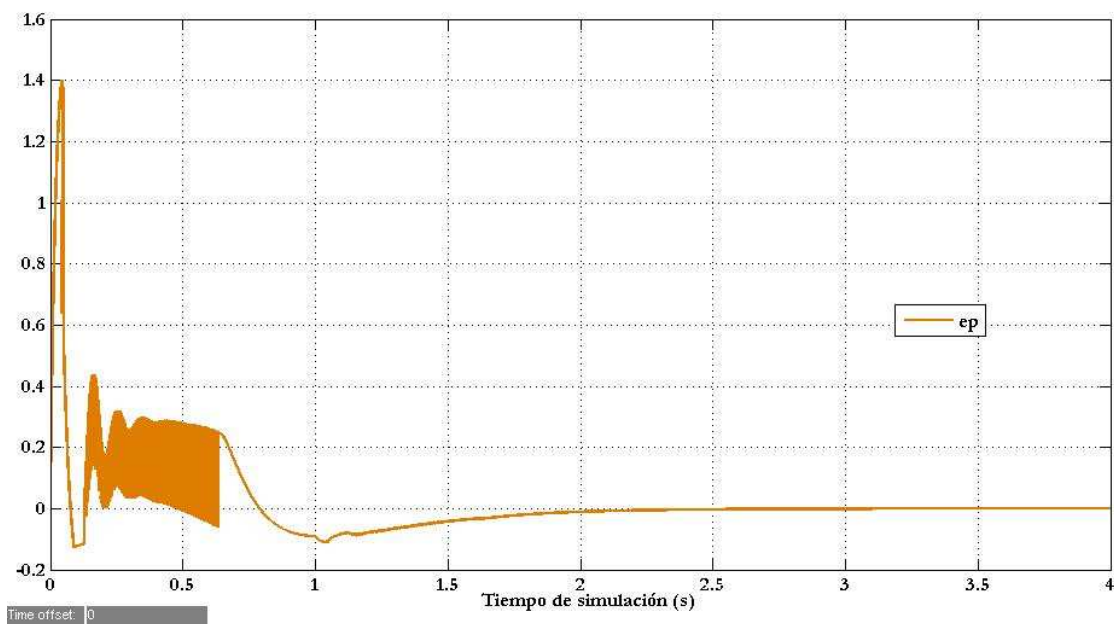
Los errores velocidad e intensidad multiplicados por el factor de ponderación correspondiente, dan como resultado el error total. Como se puede observar en las Gráficas 5.46, 5.47 y 5.48, las señales error tienden a disminuir a lo largo de la simulación, de forma que la señal de error total tiende a disminuir a lo largo del tiempo de simulación.



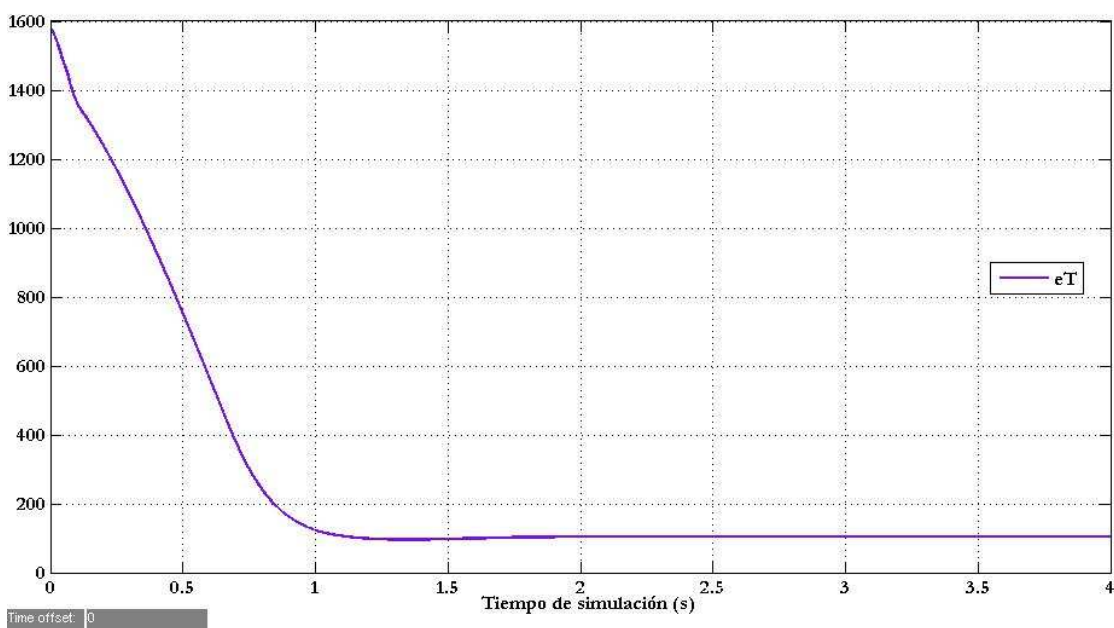
Gráfica 5.53. Señal error de velocidad en función del tiempo de simulación. Simulación 11.



Gráfica 5.54. Señal error de intensidad en función del tiempo de simulación. Simulación 11.



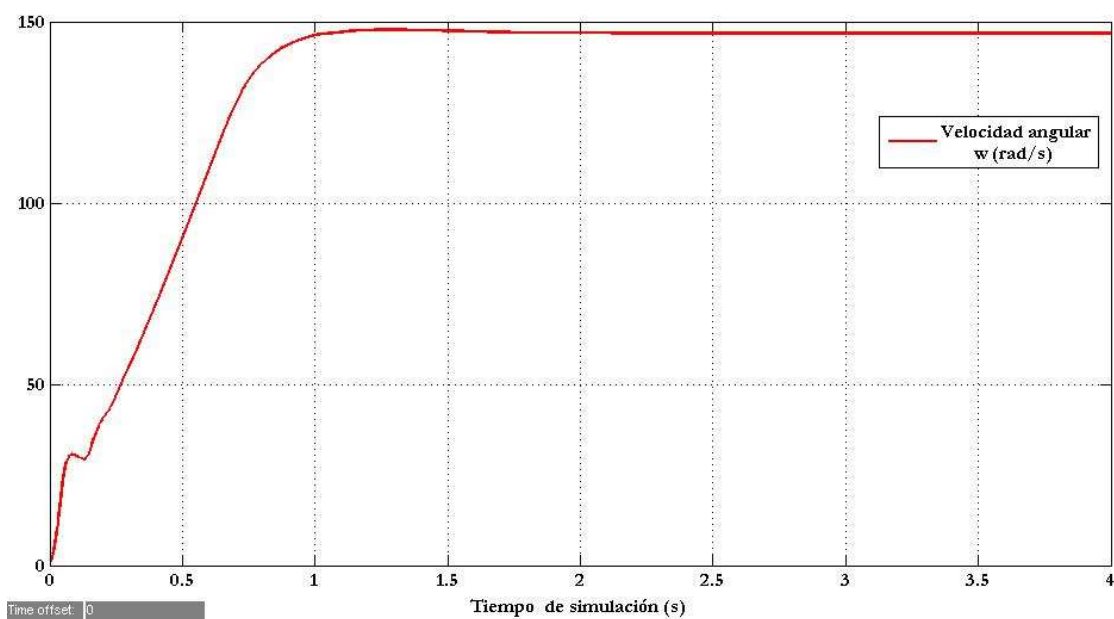
Gráfica 5.55. Señal error de potencia en función del tiempo de simulación. Simulación 11.



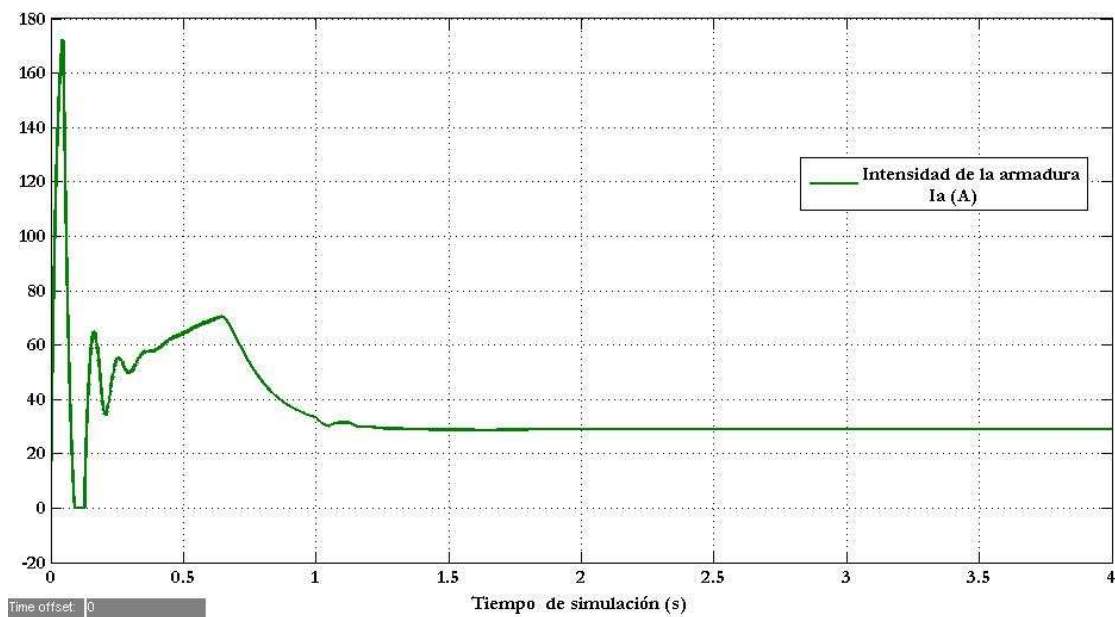
Gráfica 5.56. Señal error total en función del tiempo de simulación. Simulación 11.

5.11.2 Señales de salida velocidad, intensidad de la armadura y par obtenidas de la simulación.

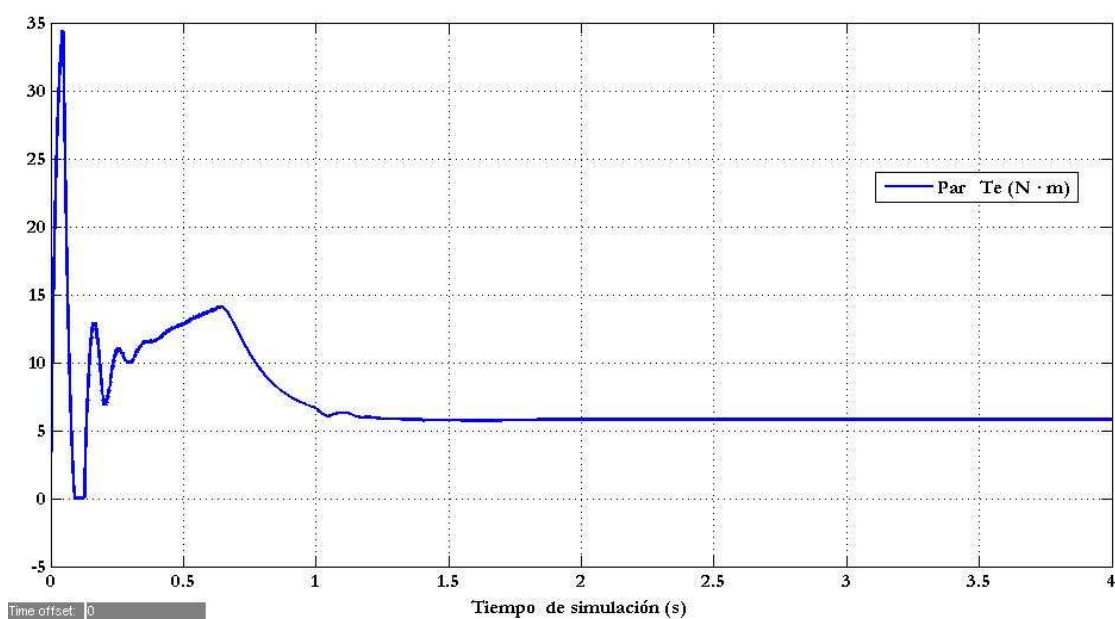
Las señales velocidad, intensidad de la armadura y par obtenidas en esta simulación aparecen en las Gráficas 5.57, 5.58 y 5.59.



Gráfica 5.57. Velocidad angular en función del tiempo de simulación. Simulación 11.



Gráfica 5.58. Intensidad de la armadura en función del tiempo de simulación. Simulación 11.



Gráfica 5.59. Par electromagnético en función del tiempo de simulación. Simulación 11.

5.12 Duodécima simulación.

Curvas características $V - I$ y $P - V$ obtenidas con el segundo modelo de panel fotovoltaico desarrollado en este proyecto con Matlab-Simulink, para las especificaciones del panel BP3150U.

En la figura siguiente aparece el esquema del segundo panel fotovoltaico derrollado en Matlab-Simulink, conocidas las especificaciones del fabricante de un panel del tipo BP3150U.

El objetivo de este modelo de panel, es poder caracterizar cualquier panel fotovoltaico conocidas las especificaciones del mismo, y con la intención de obtener una serie de curvas $V - I$ y $P - V$ para diferentes niveles de irradiación solar.

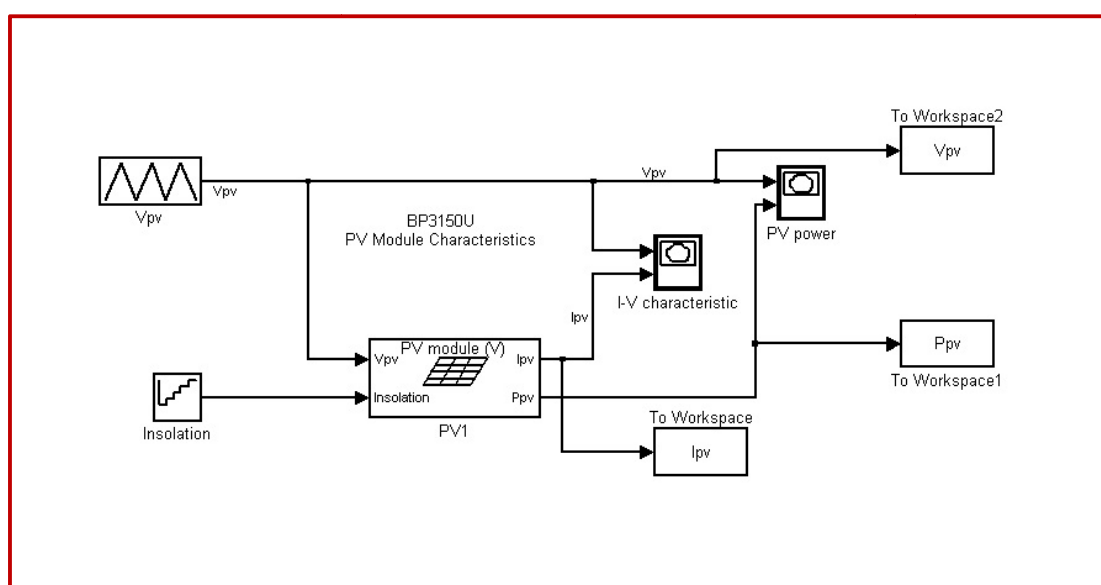
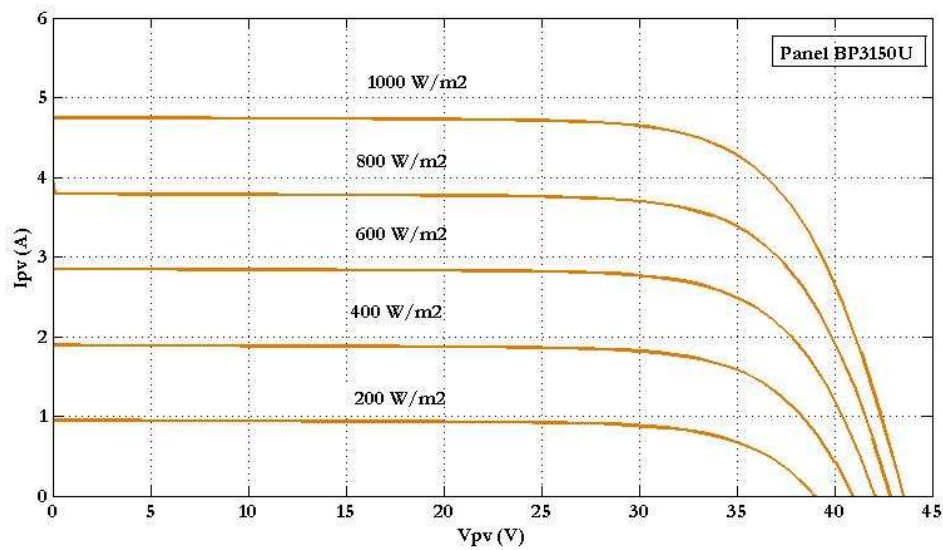
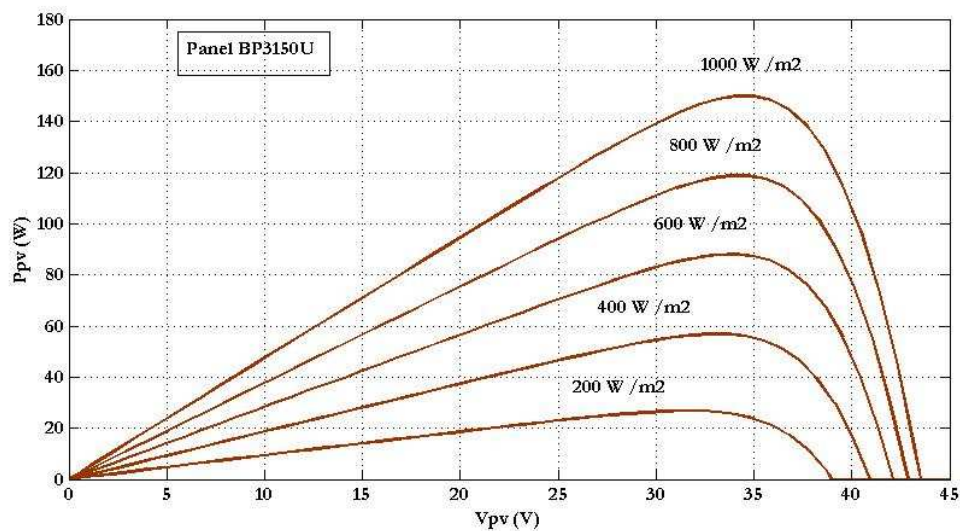


Figura 5.21. Esquema del segundo modelo de panel fotovoltaico descrito en el presente proyecto, desarrollado en Matlab-Simulink. Simulación 12.



Gráfica 5.60. Curva característica $V - I$ del segundo modelo panel fotovoltaico (Matlab-Simulink). Simulación 12.



Gráfica 5.61. Curva característica $V - P$ del segundo modelo panel fotovoltaico (Matlab-Simulink). Simulación 12.

CAPÍTULO 6.

ANÁLISIS Y

CONCLUSIONES.

6. ANÁLISIS Y CONCLUSIONES DE LAS SIMULACIONES.

En este capítulo se analizan cada uno de las particularidades a tener en cuenta en cada una de las simulaciones llevadas a cabo en este proyecto, junto con una serie de conclusiones para los casos presentados en cada simulación.

6.1 Influencia de los elementos de potencia en las simulaciones.

En este apartado se va a estudiar la influencia de los elementos de potencia en los resultados finales de la tercera y cuarta simulación, con respecto a los resultados obtenidos de la primera y segunda simulación.

6.1.1 Tercera simulación y cuarta simulación.

Estas dos simulaciones suponen añadir en los esquemas de la primera y segunda simulación (caso de estudio), elementos de control de potencia.

Los esquemas de estas dos simulaciones son idénticos salvo el bloque motor, puesto que el motor de la tercera simulación es alimentado por 100 V , mientras que el de la cuarta es alimentado por 36 V (caso de estudio de este proyecto).

Es de notar en las Gráficas 5.7, 5.8, 5.9, 5.10, 5.11 y 5.12, la caída de los valores máximos de velocidad, intensidad y par con respecto a los valores máximos obtenidos en los gráficos de la primera y segunda simulación. Esto se debe a que en esta tercera prueba se ha introducido un transistor IGBT al que llegan dos señales de entrada, una señal de tensión constante (al igual que en la primera prueba) conectado al colector 'c' y otra señal de entrada pulso conectada a la puerta 'g', de modo que en el momento en que la tensión emisor-colector es negativa o positiva pero menor que V_f , se aplica en la compuerta g un valor igual a cero, y por tanto, disminuye la corriente del colector hasta hacerse cero.

Esto es la causa fundamental, por el que los valores máximos alcanzados en la primera y segunda simulación de velocidad, intensidad de la armadura y par se ven disminuidos en la tercera y cuarta simulación como consecuencia de una variación en la tensión de alimentación.

La disminución de los valores máximos de velocidad angular es de tener en cuenta, así mientras que los valores alcanzados en la primera y segunda simulación fueron ($188,158 \text{ rad/s}$ respectivamente), ahora en la tercera y cuarta simulación los valores de velocidad angular alcanzados son ($126,106 \text{ rad/s}$ respectivamente).

6.2 Bloques de control incluidos en las simulaciones.

En este apartado se analizarán los elementos de control añadidos en los esquemas de Simulink.

Para ello se hace un breve resumen sobre cada uno de los tipos de control, y sobre los efectos que ejerce el control proporcional, derivativo e integral sobre cualquier sistema que vaya a ser controlado.

También se analizarán cada uno de los bloques de control desarrollados en las simulaciones, en concreto, se estudiarán los esquemas de control de las simulaciones comprendidas entre la quinta y la décima, llegando a una serie de conclusiones para cada caso.

6.2.1 Resumen del control proporcional, integral y derivativo.

El **control proporcional** se basa en la ganancia aplicada al sistema, según el principio de que la respuesta del controlador deber ser proporcional a la magnitud del error. No corrige ni elimina perturbaciones, pudiendo atenuar o aumentar la señal de error. Se representa a través del parámetro G_p y define la fuerza o potencia con que el controlador reacciona frente a un error.

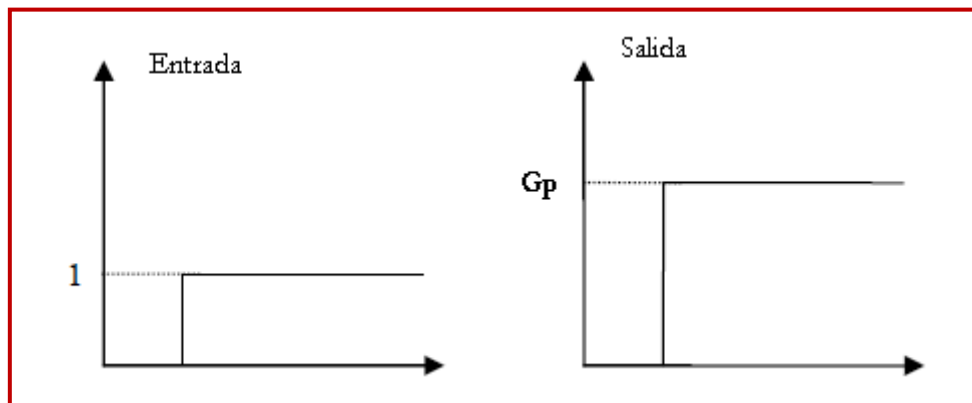


Figura 6.1. Control proporcional, señales de entrada y salida.

El **control integral** anula los errores y corrige las perturbaciones mediante la búsqueda de la señal de referencia, y necesita de un tiempo T_i para localizar dicha señal. Se representa mediante el término G_i que es el coeficiente de acción integral y es igual a $1/T_i$.

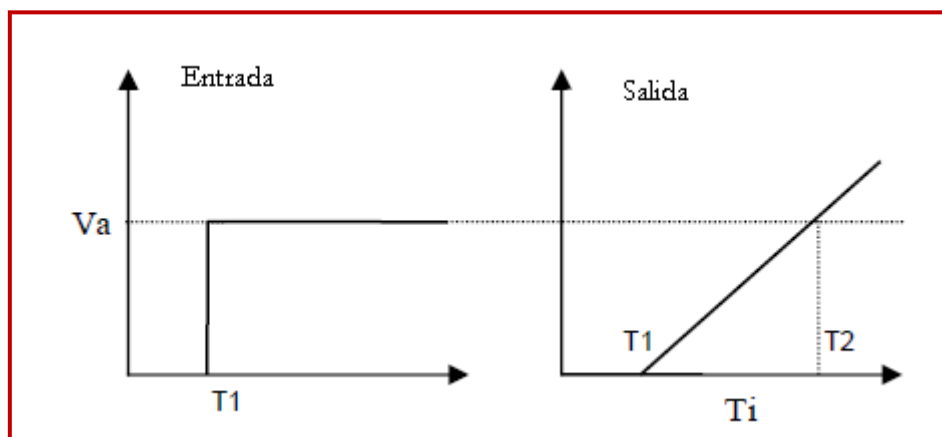


Figura 6.2. Control integral, señales de entrada y salida.

El **control derivativo** por sí solo no es utilizado, necesita estar junto al control proporcional e integral. Sirve para dar rapidez o aceleración a la acción de control. Necesita de un diferencial de tiempo T_d para alcanzar la señal de referencia, se representa mediante el término G_d que es el coeficiente de acción derivativa y es igual a T_d .

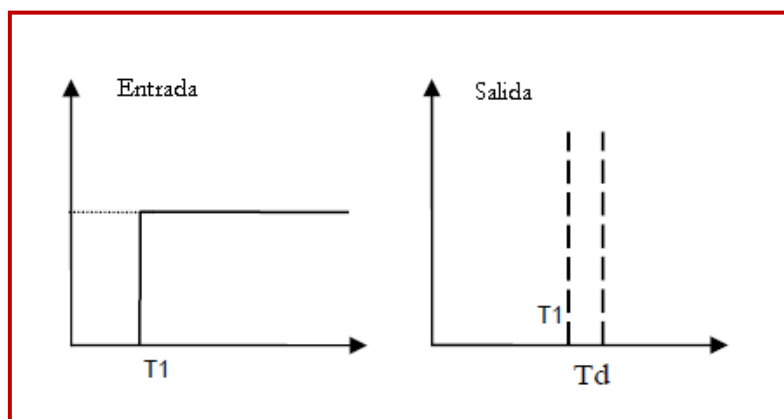


Figura 6.3. Control derivativo, señales de entrada y salida.

El controlador PID es el más completo y complejo, tiene una respuesta más rápida y estable siempre que esté bien sintonizado. Resumiendo se puede decir:

- El control proporcional actúa sobre el tamaño del error.
- El control integral rige el tiempo para corregir el error.
- El control derivativo brinda la rapidez para tal actuación.

6.2.2 Quinta simulación.

El objetivo de esta simulación es introducir en el esquema de la simulación 3, los bloques necesarios para limitar la velocidad angular.

El límite de la velocidad angular en torno a 100 rad/s se consigue con el esquema de la Figura 5.8, donde se introduce un bloque dedicado a la regulación de la misma, a la vez que se ven recortadas los valores de la señales de salida de intensidad y par.

En esta simulación también se plantea una modificación de los valores de la ganancia proporcional G que aparece en bloque dedicado a la regulación de la velocidad, y el momento de inercia del motor J . De modo, que se llega a la conclusión de que cuanto mayor sea la ganancia y menor es el momento de inercia, la curva de velocidad angular se ajusta mejor a los valor límite establecido (100 rad/s), y las curvas intensidad de la armadura y par alcanzan en menor tiempo de simulación los valores estables a los que se había llegado sin tal modificación (en este caso en torno a 10 A y $5 \text{ N} \cdot \text{m}$).

Así se puede concluir que a menor momento de inercia y mayor ganancia:

- Mejor regulación de la señal velocidad en los valores límites de partida (100 rad/s).
- Menor tiempo de establecimiento de las señales par e intensidad de la armadura.

En las figuras siguientes se comparan las señales velocidad angular, par e intensidad de la armadura en función del tiempo de simulación, para los dos casos planteados en esta simulación.

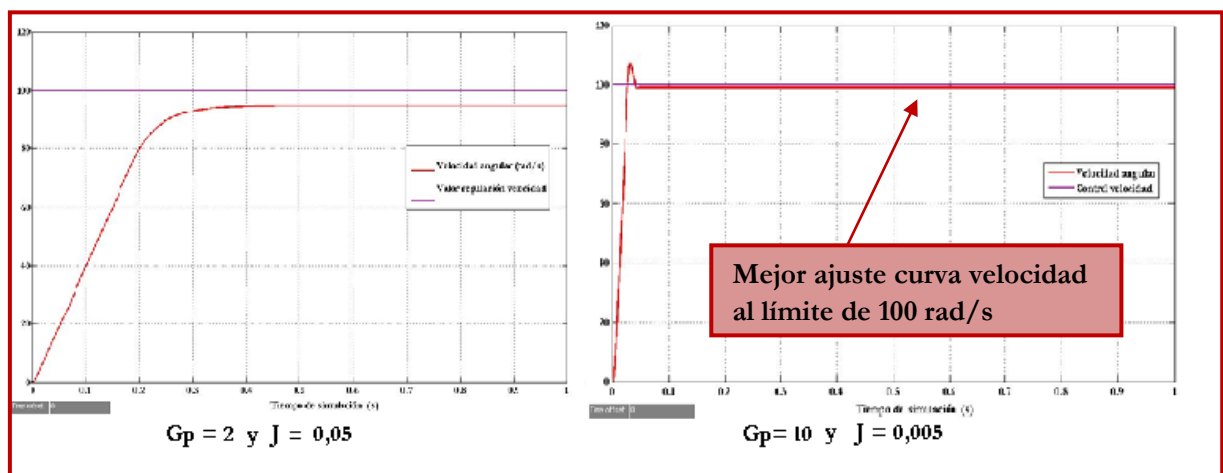


Figura 6.4. Comparación curvas velocidad angular para los dos casos planteados en la quinta simulación.

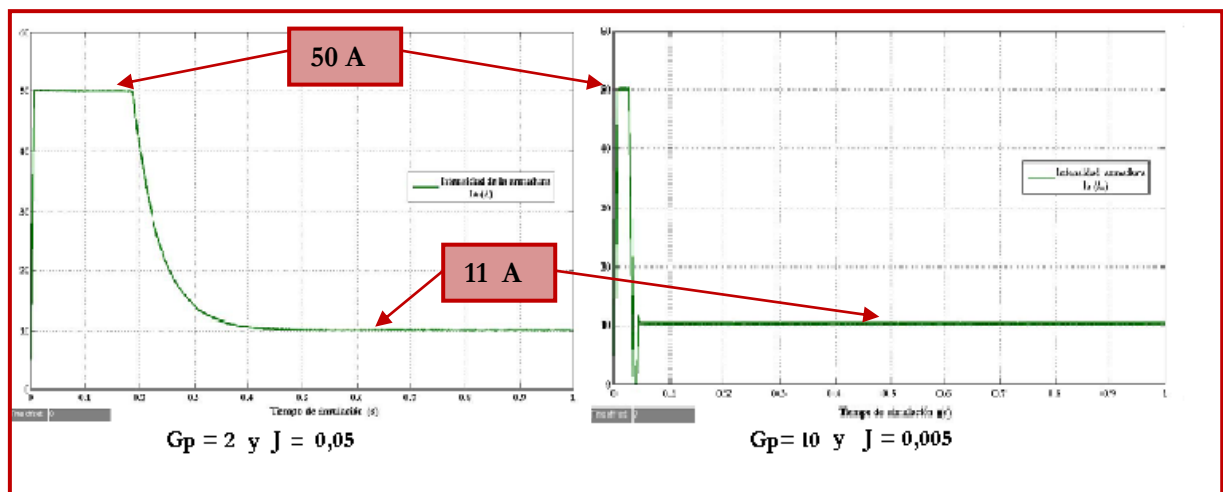


Figura 6.5. Comparación curvas intensidad de la armadura para los dos casos planteados en la quinta simulación.

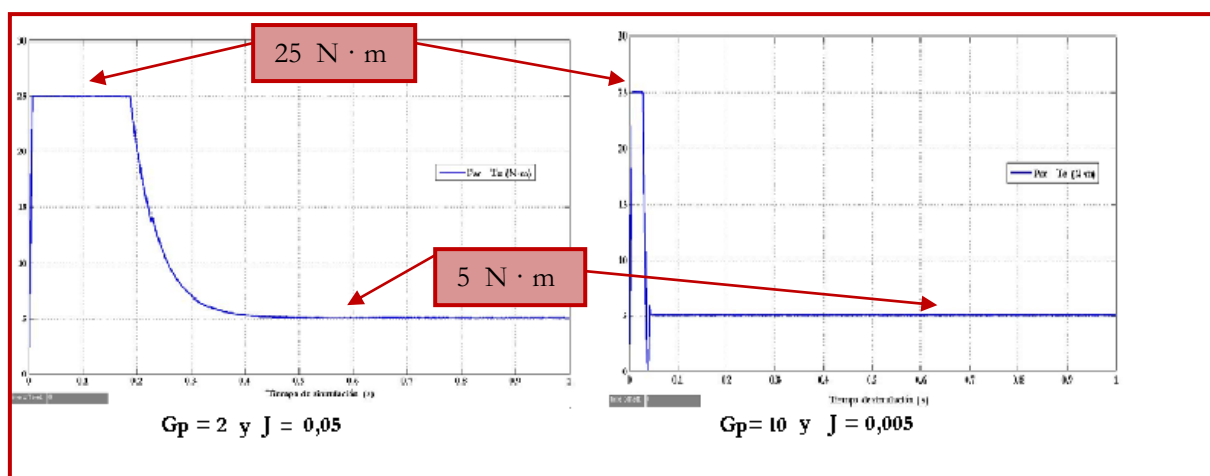


Figura 6.6. Comparación curvas par electromagnético para los dos casos planteados en la quinta simulación.

6.2.3 Sexta simulación.

El objetivo de esta simulación es regular la señal de salida de velocidad al igual que en el anterior caso, pero para una secuencia de valores ($50, 100$ y 30 rad/s) que pasa de un valor a otro cada 0.5 s del tiempo de simulación.

La regulación de la velocidad en torno a esos valores, da como resultado una señal de velocidad con una serie de saltos ajustándose a esos valores límites.

Las señales de salida de la intensidad de la armadura y par también presentan una serie de saltos en cada instante de simulación en que la velocidad angular pasa de 50 a 100 rad/s , de 100 a 30 rad/s y de 30 a 50 rad/s , de modo que en el instante de tiempo donde tiene lugar el último salto de la velocidad (1.5 s), tienden a los valores estables alcanzados en la quinta simulación (en su caso 10 A y $50 \text{ N} \cdot m$).

En esta sexta simulación también se plantea el caso de modificar los valores de ganancia G y momento de inercia del motor J . Los resultados obtenidos en estos casos llevan a la misma conclusión que en la quinta simulación, es decir, a mayor ganancia G y menor momento de inercia, la señal de salida de la velocidad angular se ajusta mejor a los valores límites establecidos, y las curvas par e intensidad de la armadura alcanzan los valores estables para cada valor de velocidad en menor tiempo de simulación.

Así se puede concluir (al igual que en la quinta simulación), que a menor momento de inercia y mayor ganancia:

- Mejor regulación de la señal velocidad en los valores límites de partida (50, 100 y 30 rad/s).
- Menor tiempo de establecimiento de las señales par e intensidad de la armadura.

Con respecto a las señales par e intensidad de la armadura de la quinta simulación, nótese que en esta simulación dichas señales presentan más saltos. Esto es debido a la modificación del límite de velocidad impuesto en la quinta simulación (100 rad/s), por los límites establecidos en esta simulación (50, 100 y 30 rad/s), de modo que para cada salto en el valor de velocidad se obtiene una serie de saltos en los valores de la intensidad de la armadura y par, de ahí que dichas señales presenten más saltos que en la anterior simulación.

En las figuras siguientes se comparan las curvas velocidad angular, intensidad de la armadura y par para los dos casos que comprende esta simulación.

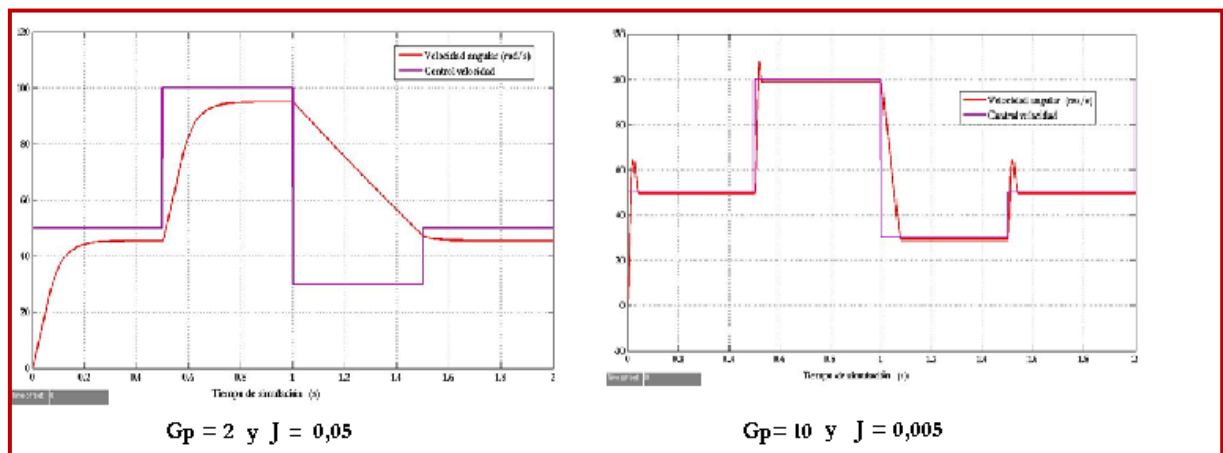


Figura 6.7. Comparación curvas velocidad angular para los dos casos planteados en la sexta simulación.

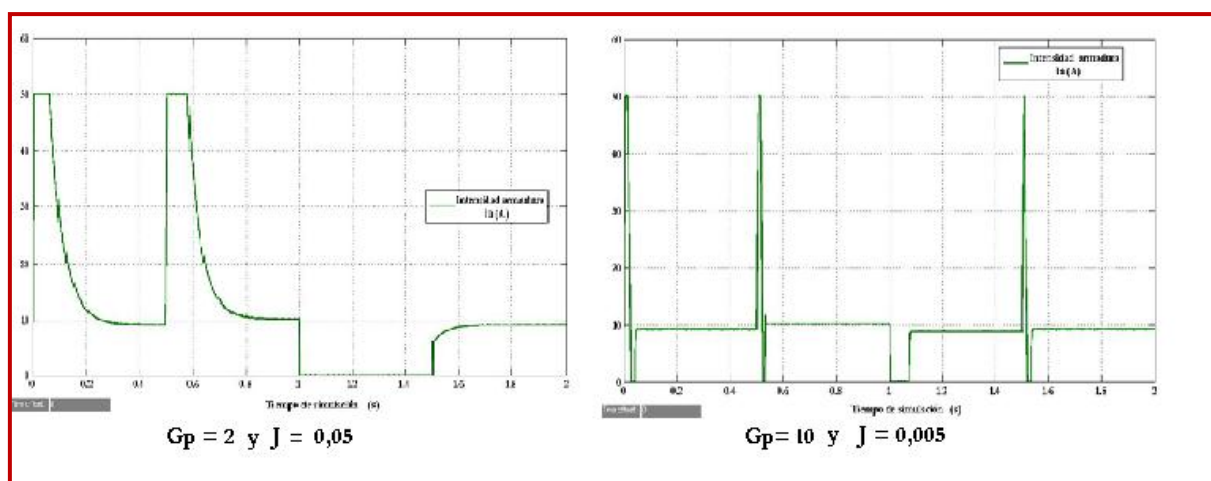


Figura 6.8. Comparación curvas intensidad de la armadura para los dos casos planteados en la sexta simulación.

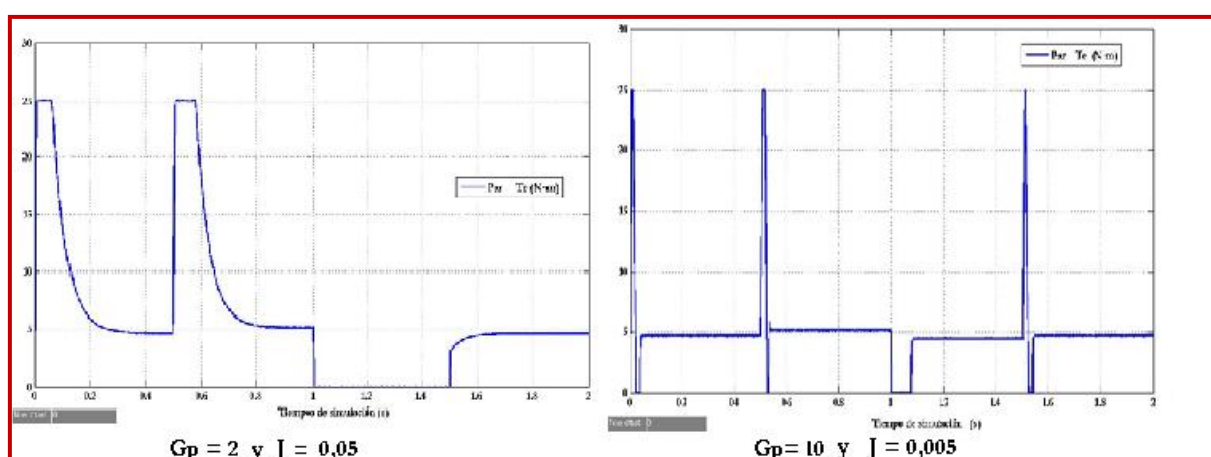


Figura 6.9. Comparación curvas par electromagnético para los dos casos planteados en la sexta simulación.

6.2.4 Séptima simulación.

Esta simulación supone una variación del caso anterior en cuanto al sistema de control de la velocidad angular. Los límites establecidos para la velocidad angular son los mismos que para la simulación anterior.

Esta simulación comprende los siguientes casos:

- Control de la señal velocidad mediante un controlador PID ($G_p = 50$, $G_i = 4$, $G_d = 0,6$) para el caso de un motor de momento de inercia de $0,05$.
- Control de la señal velocidad mediante un controlador PID ($G_p = 50$, $G_i = 4$, $G_d = 0,6$) para el caso de un motor de momento de inercia de $0,005$.
- Control de la señal velocidad mediante un controlador proporcional ($G_p = 50$) para el caso de un motor de momento de inercia de $0,05$.
- Control de la señal velocidad mediante un controlador proporcional ($G_p = 50$) para el caso de un motor de momento de inercia de $0,005$.

En las Figuras 6.10, 6.11 y 6.12 se representan las curvas de velocidad angular, intensidad de la armadura y par para los cuatro casos de estudio con el objetivo de comparar las señales obtenidas en función del control aplicado y el valor del momento de inercia.

Es de notar que con el control total PID se obtiene una curva de velocidad angular que se ajusta mejor a los límites de velocidad establecidos que con el control proporcional.

Por otro lado, las curvas de velocidad angular para un momento de inercia menor ($0,005$) se ajustan mejor a los límites establecidos que las curvas con un momento de inercia mayor ($0,05$).

En resumen, la curva de velocidad angular que mejor se ajusta a los valores límite es la que tiene un momento de inercia menor ($0,005$) y se le ha aplicado el control total PID.

Los diferentes saltos de valores que toman las señales intensidad de la armadura y par en función del tiempo de simulación se deben a los diferentes límites de velocidad angular fijados ($50, 100$ y 30 rad/s).

Se puede apreciar en la Figuras 6.11 y 6.12, que las señales par e intensidad de la armadura alcanzan sus valores estables en menor tiempo para los casos de momento de inercia menor. En estos dos casos los tiempos de establecimiento de las señales son menores.

Si se comparan las señales par e intensidad de la armadura para los casos de momento de inercia menor, se puede apreciar que las señales presentan mayor estabilidad y menos fluctuaciones para el caso donde se aplica el control total PID.

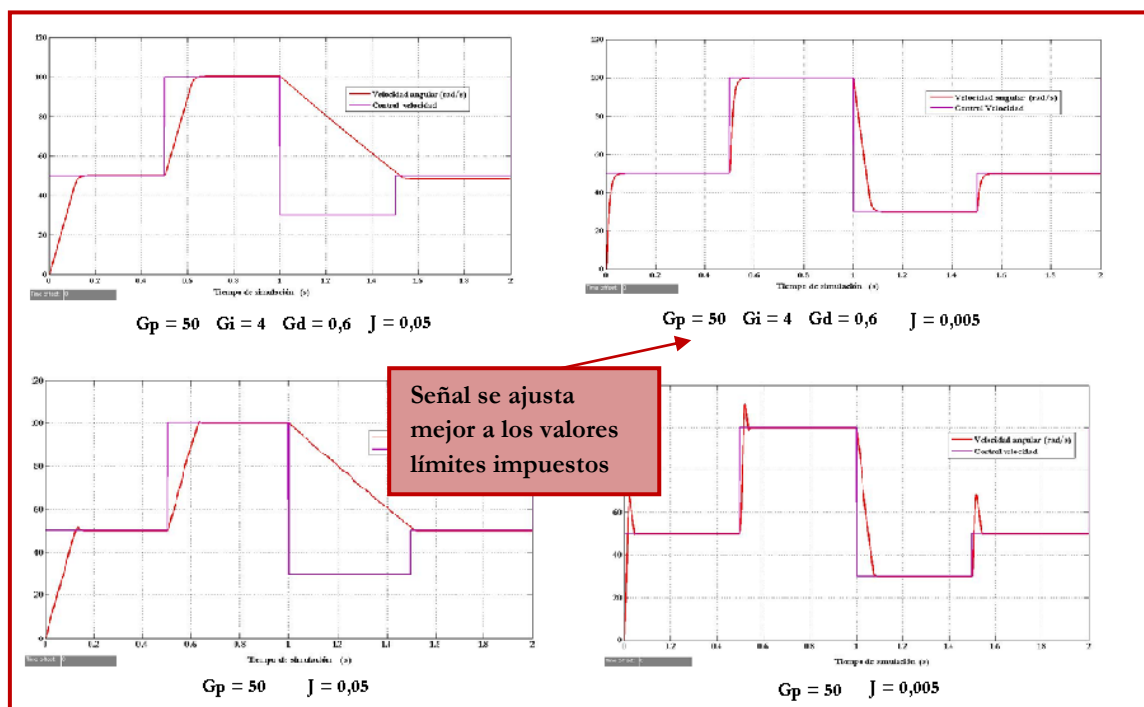


Figura 6.10. Comparación curvas velocidad angular para los cuatro casos planteados en la séptima simulación.

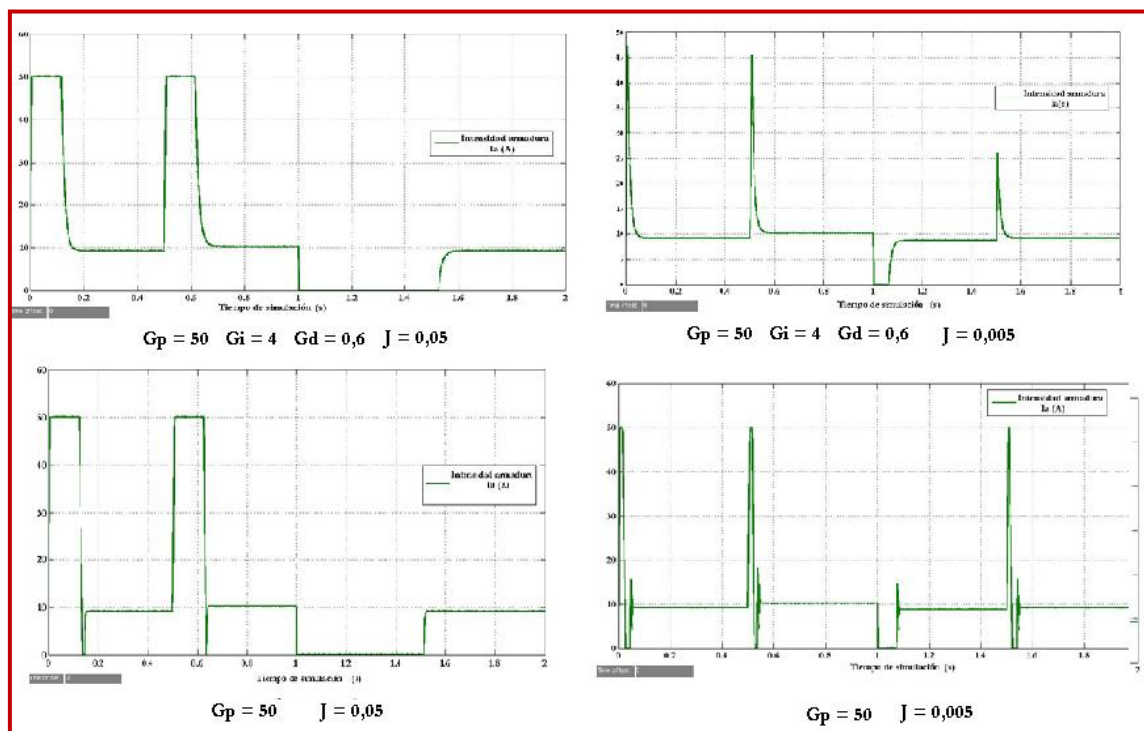


Figura 6.11. Comparación curvas intensidad de la armadura para los cuatro casos planteados en la séptima simulación.

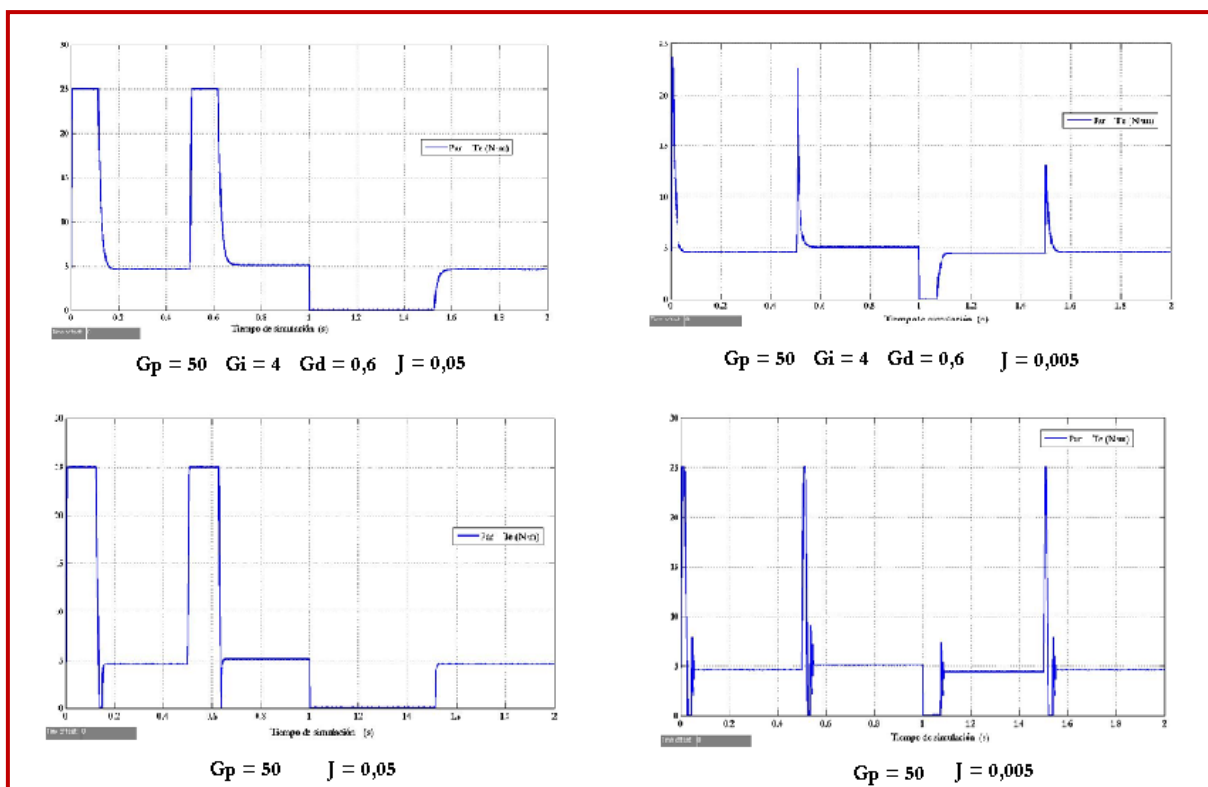


Figura 6.12. Comparación curvas par electromagnético para los cuatro casos planteados en la séptima simulación.

6.2.5 Octava simulación.

Esta simulación consiste en la regulación la velocidad angular del caso de estudio de este proyecto, mediante un controlador PID, comparándolo con un valor de referencia constante de 130 rad/s .

En las Figuras 6.13, 6.14 y 6.15 se comparan las señales de salida de velocidad angular, par e intensidad de la armadura de la simulación 2 (caso básico de estudio) con respecto a la simulación 8 (control sobre la velocidad aplicado al caso de estudio).

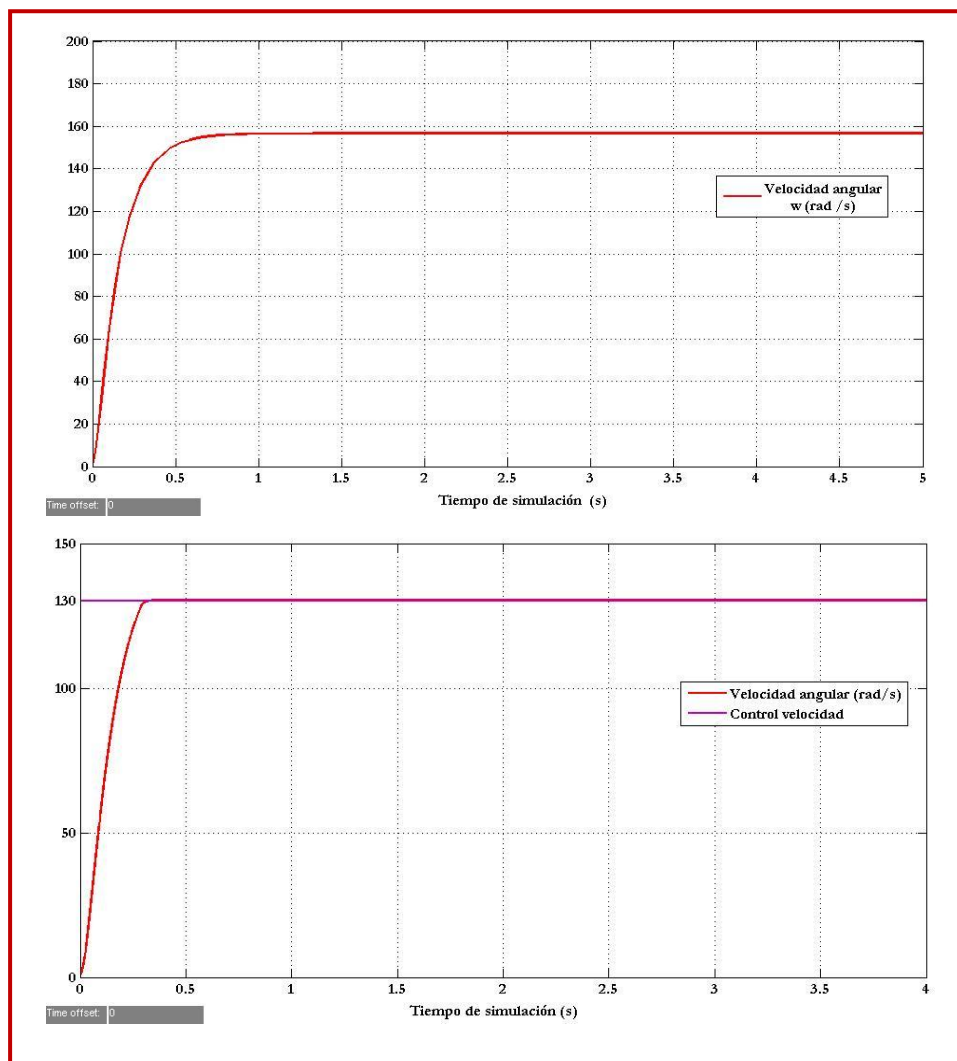


Figura 6.13. Comparación curvas velocidad angular para los casos planteados en la simulación 2 y 8 (arriba y abajo respectivamente).

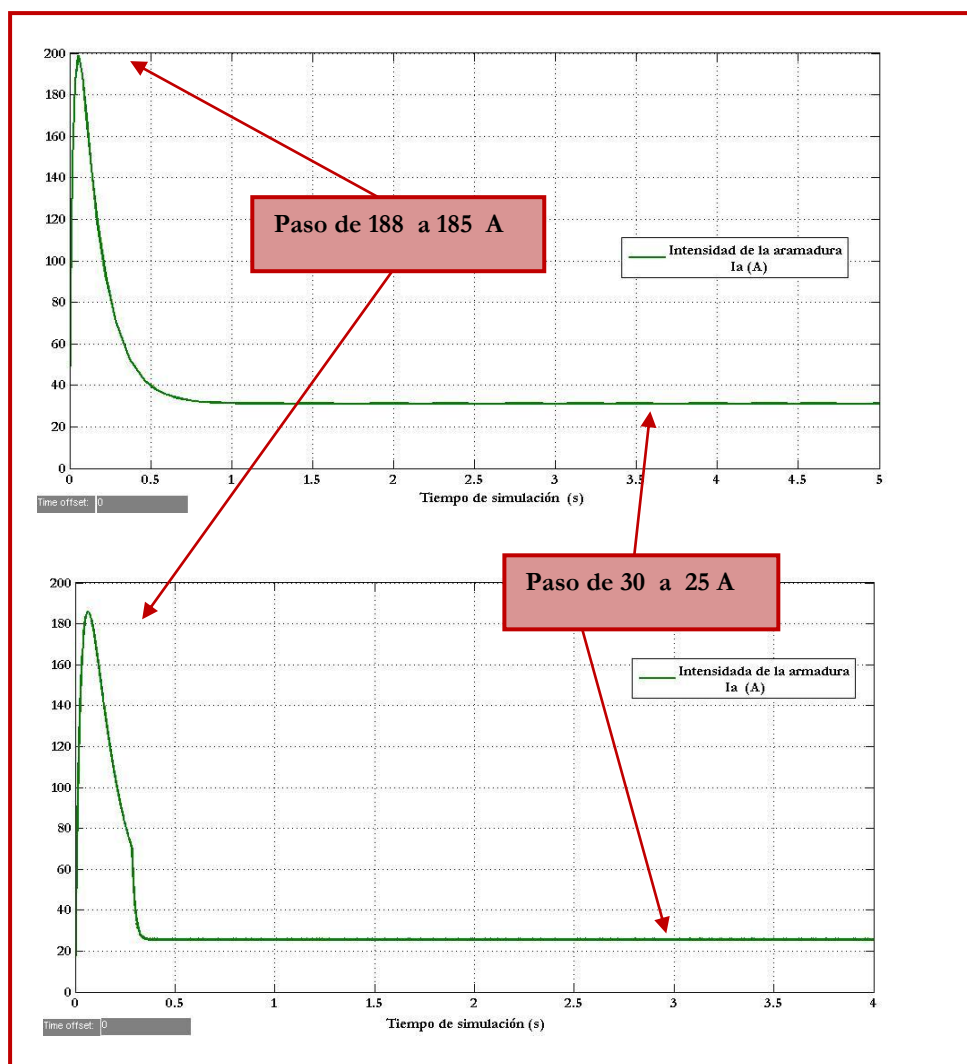


Figura 6.14. Comparación curvas intensidad de la armadura para los casos planteados en la simulación 2 y 8 (Arriba y abajo respectivamente)

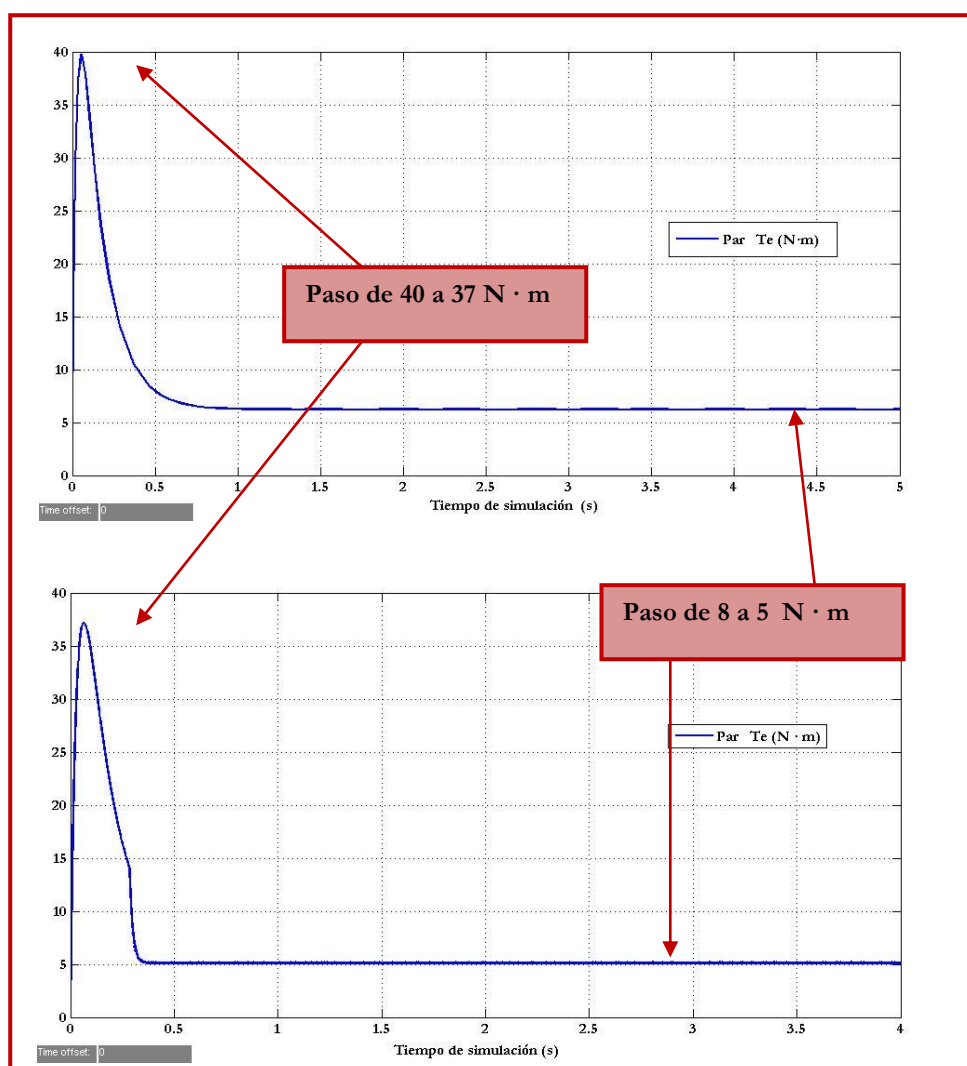


Figura 6.14. Comparación curvas par electromagnético para los casos planteados en la simulación 2 y 8 (Arriba y abajo respectivamente)

La regulación de la velocidad angular en torno a un valor de referencia de 130 rad/s inferior al valor estable alcanzado en segunda simulación (156 rad/s), supone una reducción de los valores alcanzados de par e intensidad de la armadura en la simulación 8, con respecto a los valores alcanzados en la segunda simulación.

6.2.6 Novena y décima simulación.

Estas dos simulaciones difieren en el bucle donde se calculan los errores. Así mientras en la novena simulación se obtienen el error velocidad e intensidad, en la décima simulación se obtiene además de estos errores el error de potencia.

Las señales de salida de velocidad, intensidad y par de ambas simulaciones son las mismas para ambos casos. Esto se explica debido a que el error de potencia a lo largo de la simulación tiende a cero, y por tanto, el error total al final del tiempo de simulación tiene el mismo valor que el error total de la novena simulación pues resulta de la suma del producto de los errores velocidad e intensidad por sus correspondientes factores de ponderación.

La señal del error de potencia presenta poca fluctuación a lo largo del tiempo de simulación. Esta señal parte de un valor pequeño (próximo a 0,15), disminuye y aumenta ligeramente, hasta que a los 2 s se hace cero. La estabilidad que presenta esta señal puede ser debida a la señal de potencia de entrada pues ésta se obtiene como el producto de la señal de intensidad de la armadura por el valor de tensión constante de 36 V. Esto no ocurrirá así en el caso en que esta fuente de tensión constante que alimenta el motor, sea sustituida por un panel fotovoltaico.

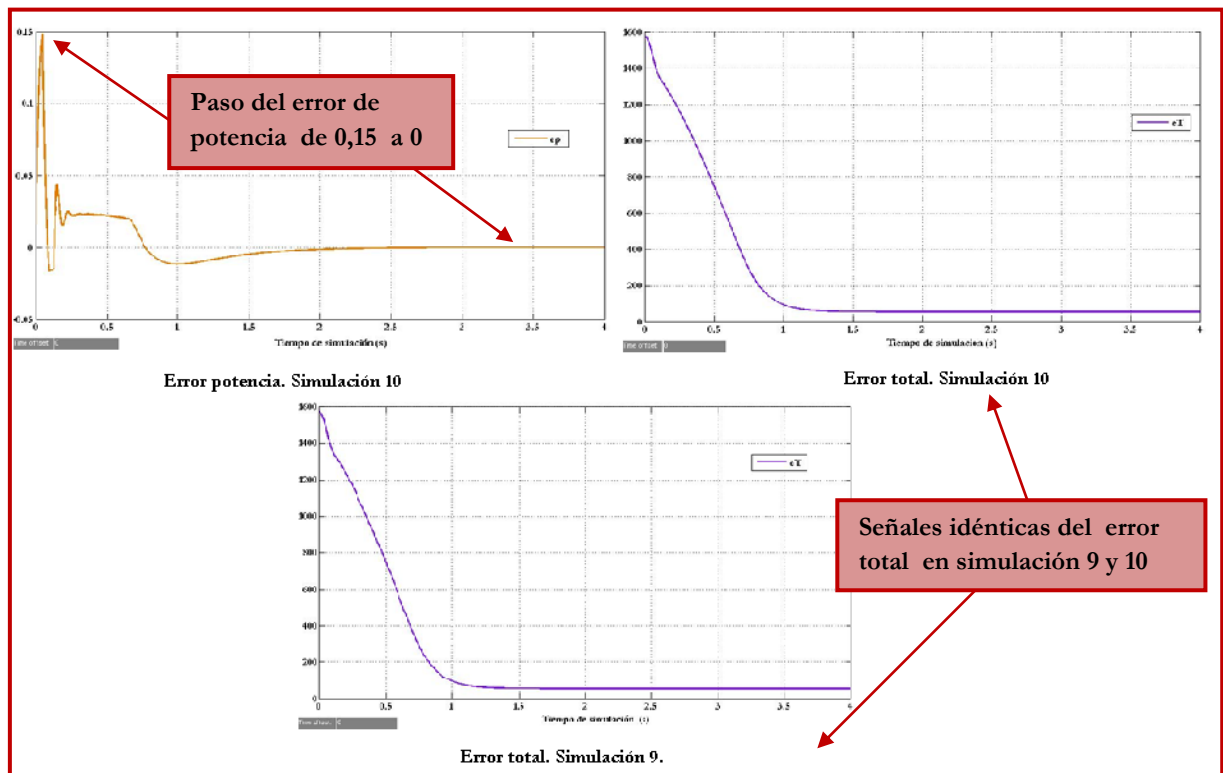


Figura 6.15. Error de potencia y total de la simulación 10, y error total de la simulación 9. Nótese que la señal error total es la misma en ambas simulaciones. Esto se debe a que la señal de error de potencia toma valores muy cercanos a cero y al final del tiempo de simulación es cero, por tanto, no influye en el valor del error total.

En las Figuras 6.16, 6.17 y 6.18, se comparan las señales velocidad, intensidad y par de la simulación 2 (caso básico de estudio) con respecto a las obtenidas en la simulación 10 (caso de estudio incluyendo además de elementos de potencia, el control PID).

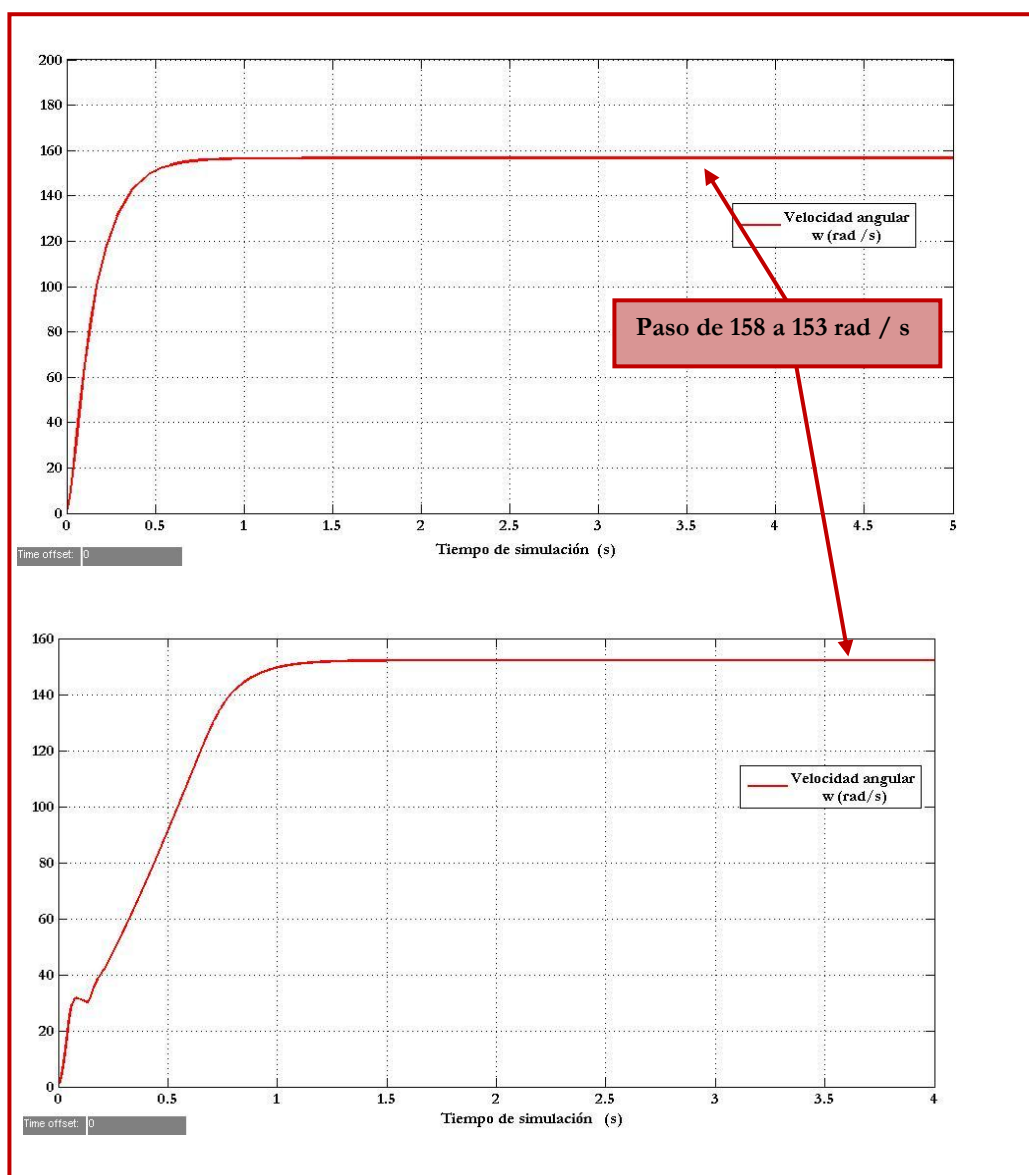


Figura 6.16. Comparación de la señal velocidad angular para los casos de la simulación 2 y 10.

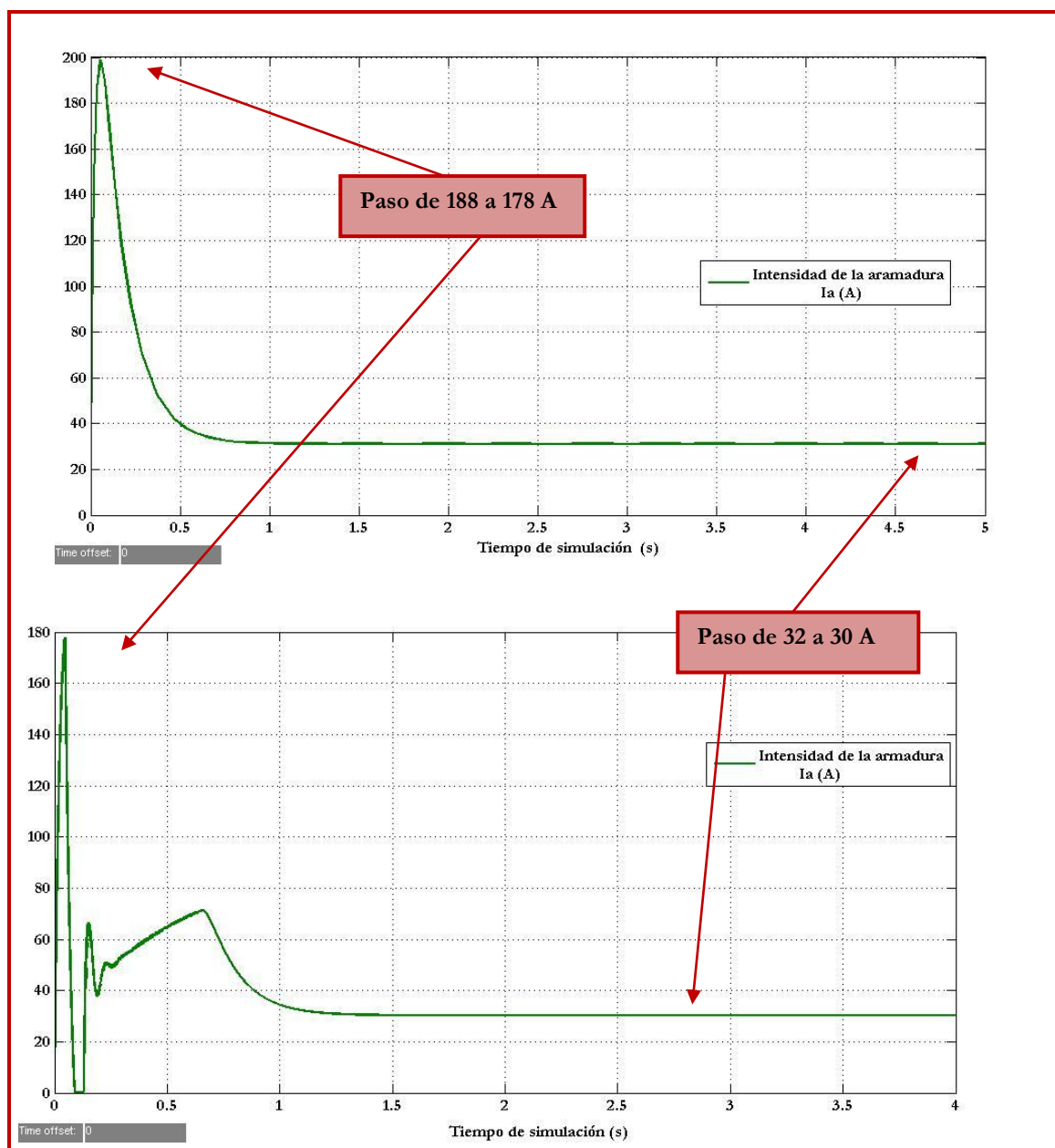


Figura 6.15. Comparación de la señal intensidad de la armadura para los casos de la simulación 4 y 10 (izquierda y derecha respectivamente)

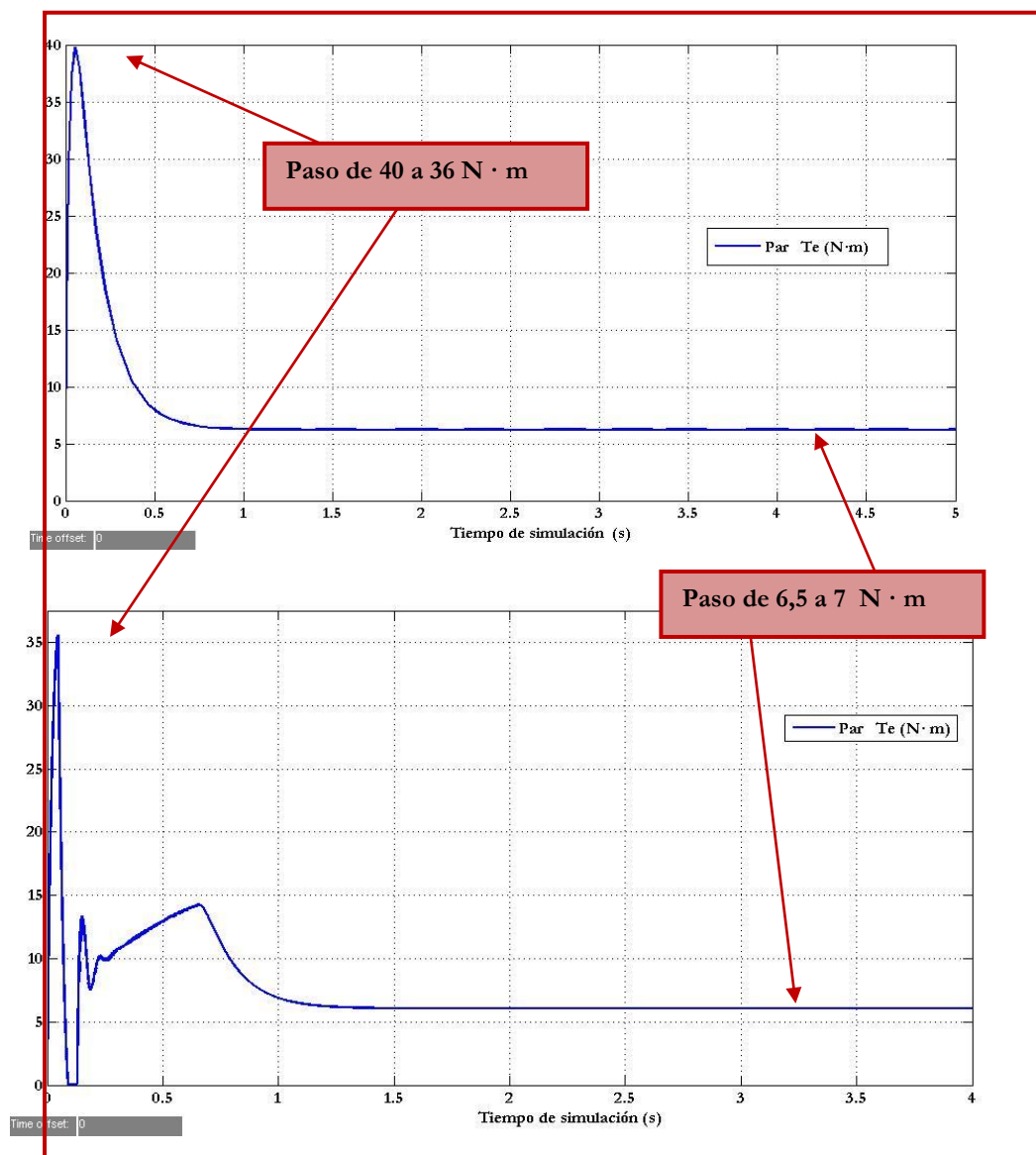


Figura 6.15. Comparación de la señal intensidad de la armadura para los casos de la simulación 2 y 10 (izquierda y derecha respectivamente)

Las señales de salida de velocidad angular, par e intensidad de la armadura de la simulación 10 tienden a unos valores estables cercanos a los obtenidos en la simulación 2. El control PID aplicado en la simulación 10 no tiene mucho sentido, ya que el objetivo de ese control es ajustar las señales de salida a unos valores de referencia (156 rad/s , $187,8 \text{ A}$), siendo estos los valores estables que alcanzan dichos parámetros en el caso ideal de la simulación 2. Este control tendrá sentido cuando el motor no se alimente de una fuente de tensión constante sino de un panel fotovoltaico.

Por otro lado, existe una diferencia significativa en el control aplicado en esta simulación con respecto al control aplicado en la simulación 8. Así mientras que en esta simulación se trata de controlar tres variables (velocidad angular, intensidad y potencia) con unos valores de referencia próximos a los estables, en la simulación 8 se regula solamente la velocidad angular comparándola con una señal constante de referencia de 130 rad/s .

6.3 Análisis del modelo final de motor de continua de imanes permanentes alimentado por un panel fotovoltaico.

El esquema final del caso de estudio de este proyecto aparece representado en la Figura 5.20, correspondiente a la undécima simulación.

La única diferencia con respecto al esquema de la simulación 10, radica en que se ha sustituido la fuente de tensión constante por un modelo de panel fotovoltaico, en concreto, el primer modelo descrito en este proyecto.

Tal modificación con respecto al esquema de la décima simulación, da sentido al control aplicado en el mismo. Así mientras que el control en la simulación 10 no tenía demasiada importancia, el control cuando la alimentación al motor no es constante es estrictamente necesario.

Además, existe una clara diferencia con respecto al esquema de la simulación 10 en cuanto a los bucles donde se calculan las señales error de potencia e intensidad. Así, mientras que en el esquema de la simulación 11 las señales que van al filtro de potencia corresponden con un valor constante de potencia y una señal de potencia obtenida como producto de la señal intensidad (suma de la señal intensidad de salida del motor más la señal intensidad del panel solar) por la señal tensión proporcionada por el panel fotovoltaico, en la simulación 10 las señales que van al filtro de potencia son ese mismo valor fijo de potencia junto la señal de potencia obtenida como producto de la señal intensidad (intensidad de salida del motor) por el valor constante de 36 V.

En el bucle de cálculo del error intensidad, existen diferencias en cuanto a las señales que entran en el filtro de intensidad. Así, mientras que en la décima simulación estas señales corresponden a un valor constante de intensidad junto con la señal de intensidad de salida del motor, en la undécima simulación estas señales son el valor de referencia de intensidad junto con la señal intensidad obtenida como suma de las intensidades de salida del motor y del panel fotovoltaico.

En la Figura 6.16 se comparan los esquemas de la simulación 10 y 11.

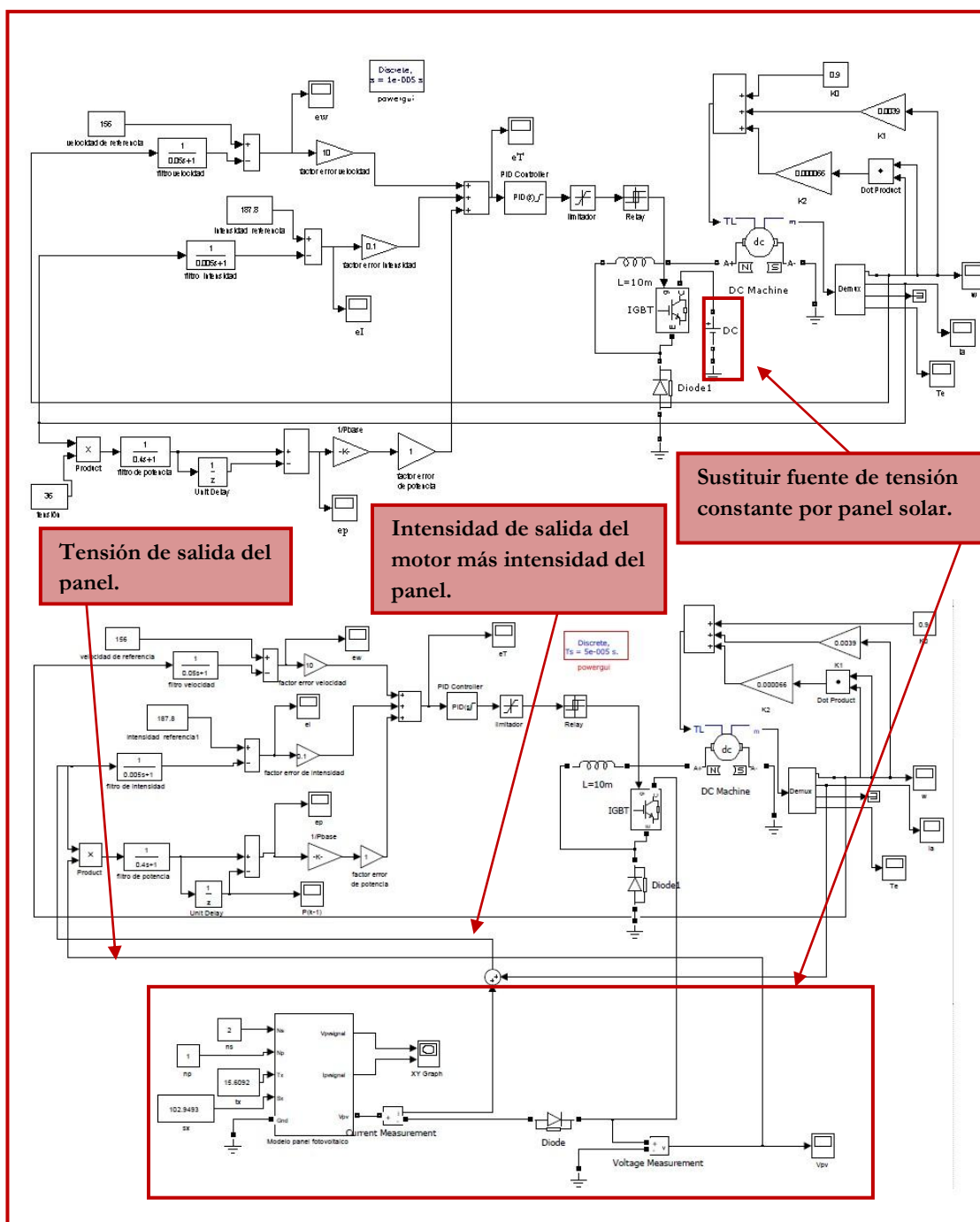


Figura 6.16. Comparación de los esquemas de la simulación 10 y 11. Arriba esquema de la simulación 10 y abajo esquema de la simulación 11.

El incluir el esquema de control en la simulación 11 es imprescindible, tal es así que como paso previo al esquema de esta simulación, se hizo una primera prueba sustituyendo la fuente de tensión constante por el modelo de panel fotovoltaico en el esquema de la cuarta simulación, de modo que simulación tardó en cargarse alrededor de 50 minutos. Luego, cuando se incluyó el bloque de control, la simulación se cargo en un tiempo menor. Por tanto, para una señal de alimentación del motor no constante, es necesario incluir un bloque de control.

En las figuras que siguen se compara las señales del error velocidad, intensidad, potencia y error total aplicado al controlador PID, para las simulaciones 10 y 11.

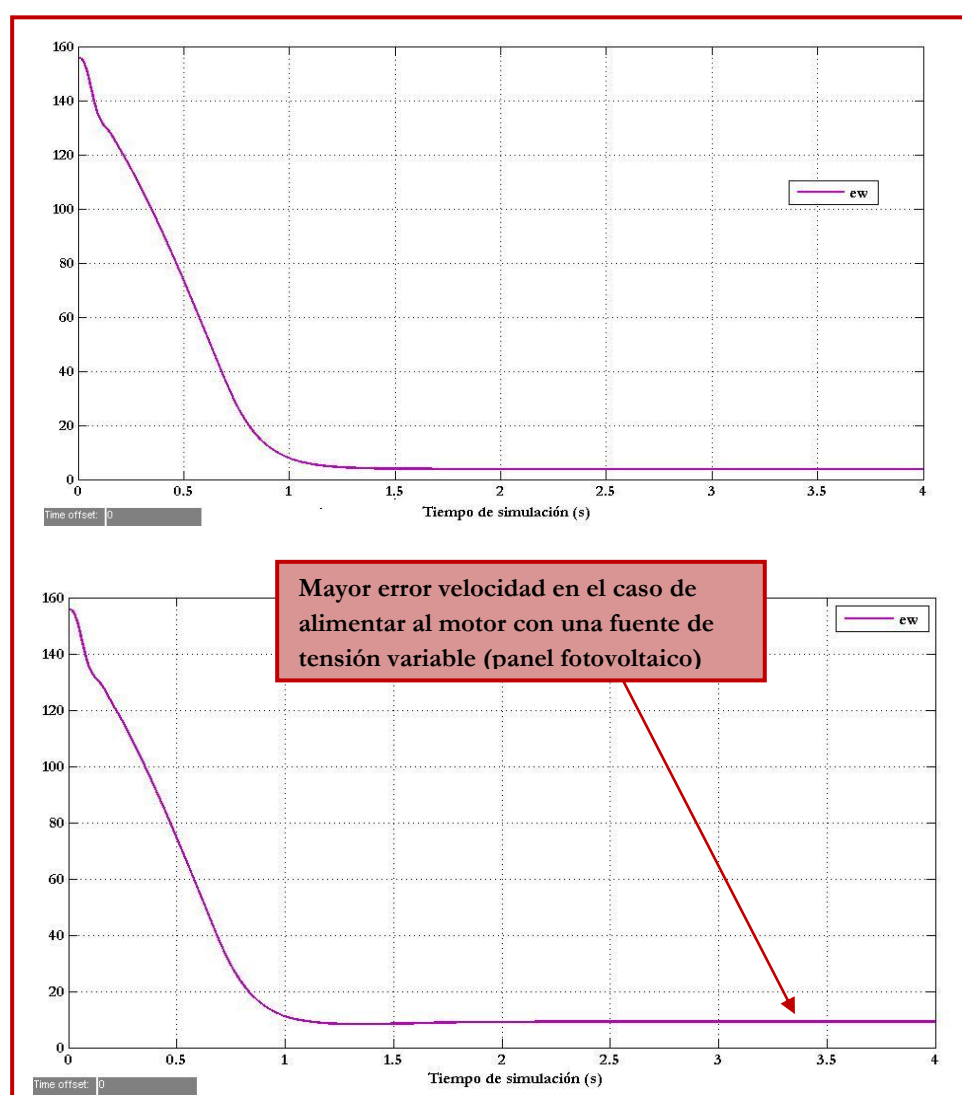


Figura 6.17. Comparación de las señales error de velocidad de las simulaciones 10 (arriba) y 11 (abajo).

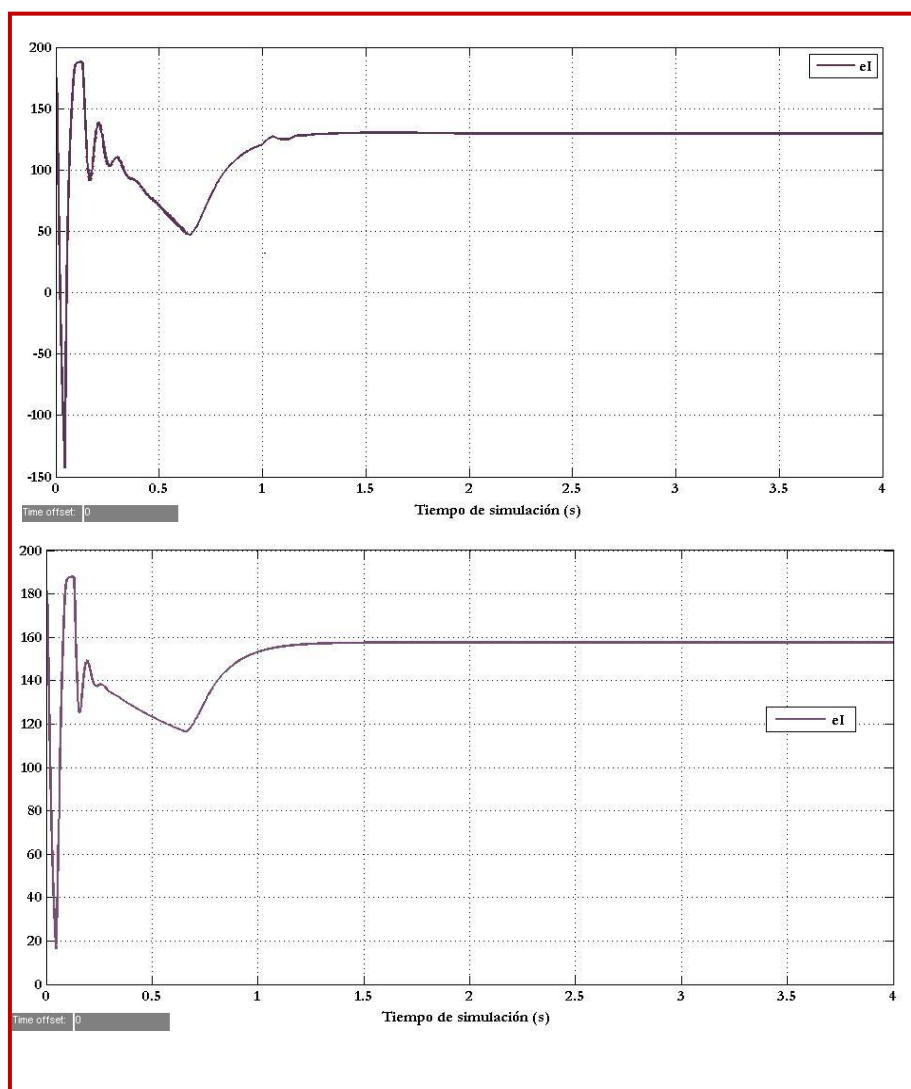


Figura 6.18. Comparación de las señales error de intensidad de las simulaciones 10 (arriba) y 11 (abajo).

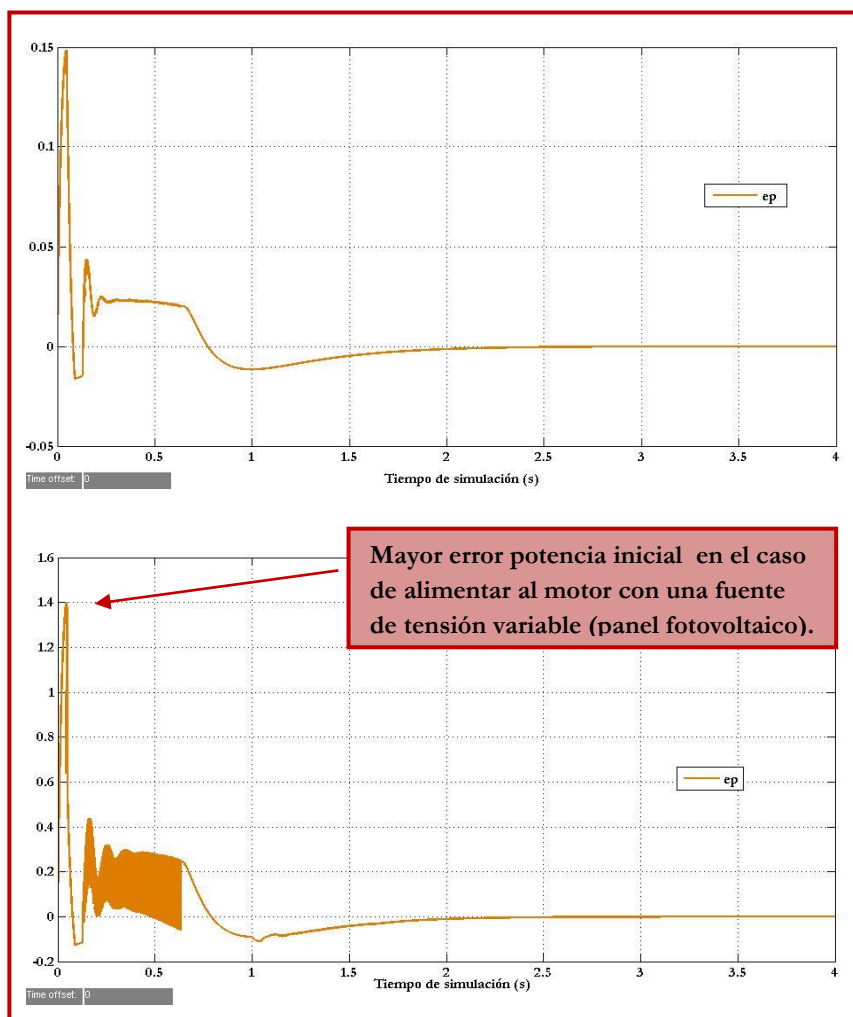


Figura 6.19. Comparación de las señales error de potencia de las simulaciones 10 (arriba) y 11 (abajo).

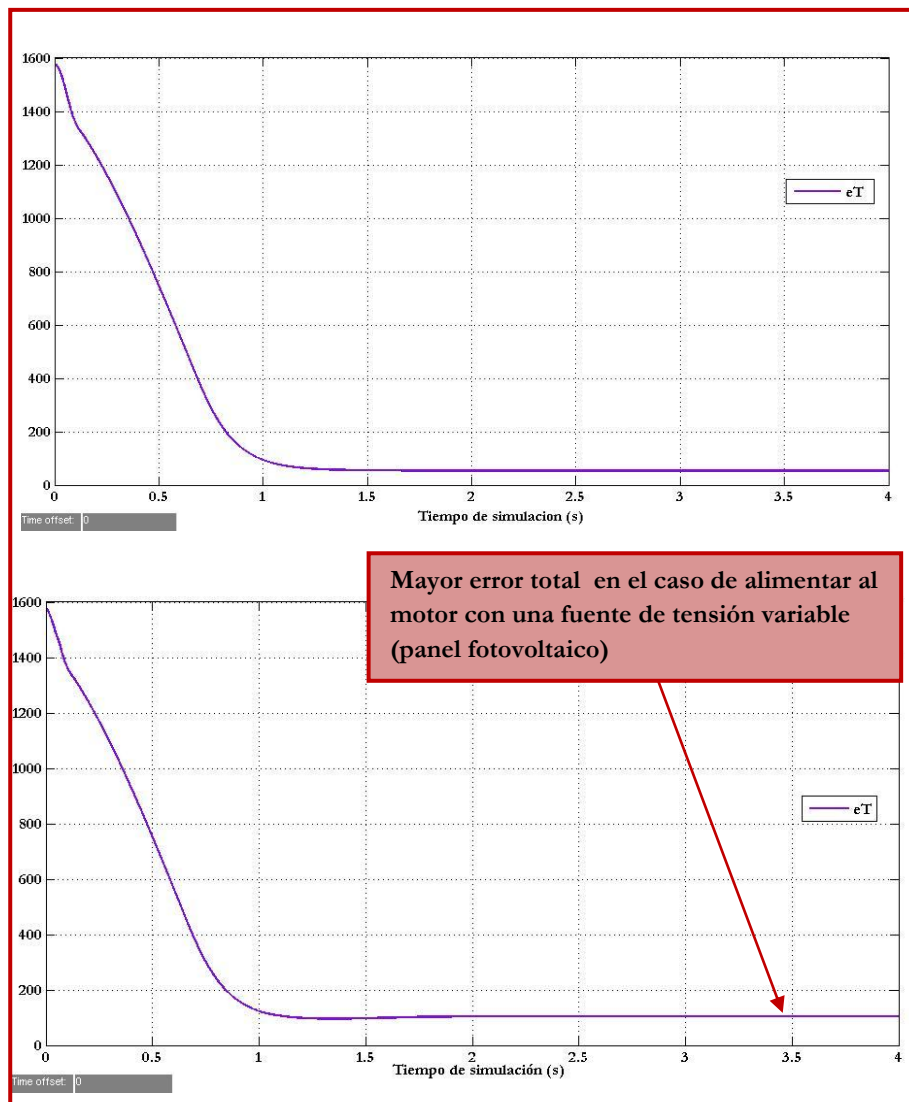


Figura 6.20. Comparación de las señales error total aplicado al controlador PID de las simulaciones 10 (arriba) y 11 (abajo).

Como se puede apreciar en las Figuras 6.20, el error total es mayor en el caso de alimentar al motor con un panel fotovoltaico. Esto es lógico, ya que en el caso de la simulación 10, estamos alimentando al motor con una fuente ideal de tensión durante todo el tiempo de simulación, sin embargo, en la onceava simulación la alimentación al motor no es con una señal de tensión constante.

Las señales velocidad, intensidad de la armadura y par son similares a las obtenidas en la décima simulación.

6.4 Características I-V y P-V de un panel fotovoltaico e influencia con el nivel de irradiación solar.

Como ya se explicó en capítulos anteriores, la intención de este segundo modelo de panel fotovoltaico, es poder caracterizar a todo panel fotovoltaico, conocidas las especificaciones dadas por el fabricante del mismo.

En este caso se ha simulado el panel tipo BP3150U, cuyas especificaciones vienen dadas en el Anexo I de este proyecto.

Así se obtienen diferentes curvas $I - V$ y $P - V$, para diferentes niveles de irradiación solar, pudiendo observar que cuanto mayor es el nivel de irradiación solar mayor es la intensidad de la célula solar y mayores valores de tensión de la célula se obtienen (Figura 6.21).

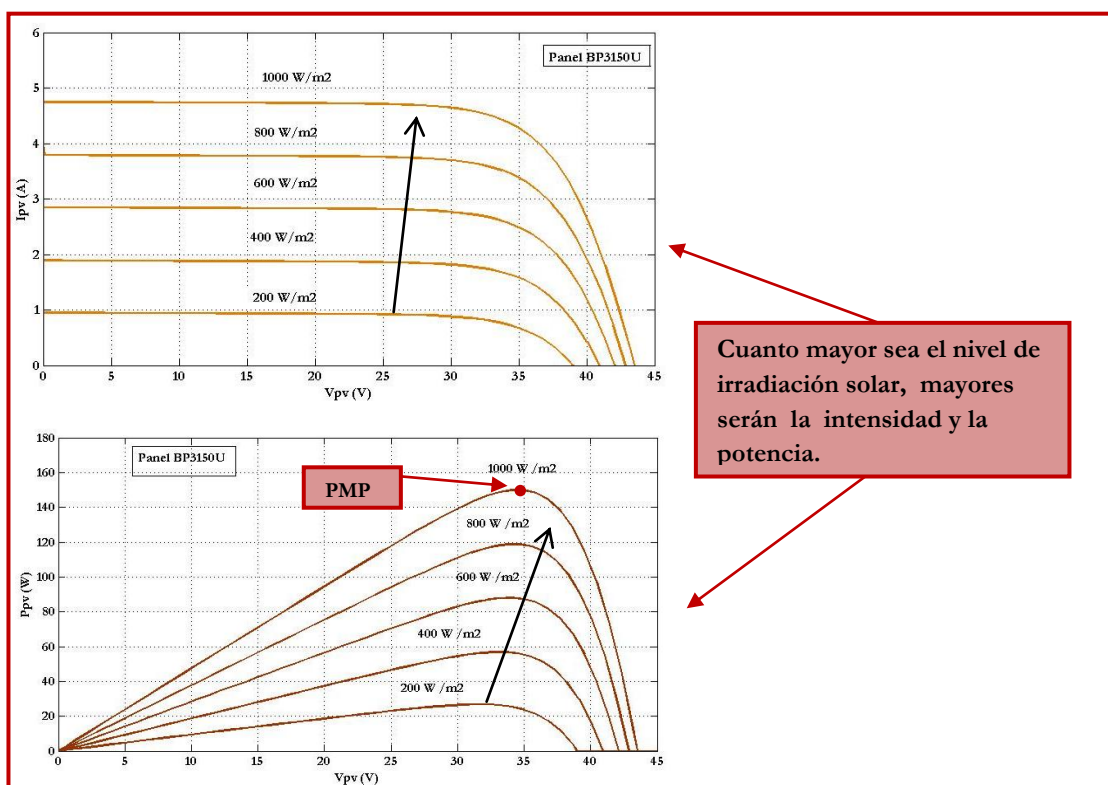


Figura 6.21. Curvas características I-V y P-V.

BIBLIOGRAFÍA.

- [1] An Efficient Tri-Loop Controller for Photovoltaic Powered Four-Wheel Electric Vehicle, (Institute of Electrical and Electronics Engineers).
- [2] A Hybrid Photovoltaic PV Array-Battery Powered EV-PMDC Drive Scheme, (Institute of Electrical and Electronics Engineers)
- [3] Workshop: Matlab/Simulink in Drives and Power electronics, DC Motor Chopper Control', publicado por Universite Paris-sud 11.
- [4] A Photovoltaic Array Simulation Model for Matlab-Simulink GUI Environment, (Institute of Electrical and Electronics Engineers).
- [5] PV Module Simulink models, publicado por University of Colorado.
- [6] Máquinas Eléctricas, Rafael Sanjurjo Navarro, (editorial McGraw-Hill).
- [7] Máquinas Eléctricas, Stephen J.Chapman, (editorial McGraw-Hill).
- [8] Máquinas Eléctricas, Javier Sanz Feito, (editorial Pearson Prentice Hall).
- [9] Novel Control Strategies For Photovoltaic Powered PMDC Motor Drives, (Institute of Electrical and Electronics Engineers).
- [10] Novel Control Strategies using Load Matching for Maximum Photovoltaic Energy Utilization, (Institute of Electrical and Electronics Engineers).
- [11] A Novel Maximum Power Trecking Controller for a Stand-alone Photovoltaic DC Motor Drive, (Institute of Electrical and Electronics Engineers).
- [12] <http://web.ing.puc.cl/~power/paperspdf/dixon/tesis/Rodriguez.pdf>.
- [13] http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_7611.pdf.
- [14] Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals, Padmaraja Yedamale, (Microchip Technology Inc).

ANEXO I.
ESPECIFICACIONES
PANEL BP3150U.

BP3150U Solar Panel from BP Solar

Specifications

Electrical Characteristics	
STC Power Rating P_{mp} (W)	150
Open Circuit Voltage V_{oc} (V)	43.5
Short Circuit Current I_{sc} (A)	4.75
Voltage at Maximim Power V_{mp} (V)	34.5
Current at Maximim Power I_{mp} (A)	4.35
Panel Efficiency	11.9%
Fill Factor	72.6%
Power Tolerance	
Maximum System Voltage V_{max} (V)	1000
Maximum Series Fuse Rating (A)	
Temperature Coefficients	
Temperature Coefficiency of I_{sc}	0.070 %/°C
Temperature Coefficiency of V_{oc}	-0.37 %/°C
Temperature Coefficiency of P_{mp}	
Mechanical Characteristics	
Cell Type	Polycrystalline Cell
Cell Size(mm)	
Cells	72
Dimensions	
Weight	
Junction Box (Safety Rating, Bypass Diodes)	
Positive Cable (Length, Cable Cross-Section)	
Negative Cable (Length, Cable Cross-Section)	
Plug Connector (Type, Safety)	
Front Cover (Thickness,Material)	
Backsheet Cover (Color, Thickness, Material)	
Encapsulation Materials	
Frame Material	
Operation Conditions	
Nominal Operating Cell Temperature (NOCT)	
Operating Temperature	

Maximum Load	
Hail Storm Rating	
Fire Safety Rating	
Warranty & Certification	
Certificates	
Defects & Workmanship Warranty Period	
90% Power Output Warranty Period	
80% Power Output Warranty Period	
Are Warranties Insured By Third Party	